



Stressfaktor Mensch

Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager
– Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung

Anne Eckhardt

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert im
Niedersächsischen Vorab der Volkswagenstiftung



VolkswagenStiftung



Niedersächsisches Ministerium
für Wissenschaft und Kultur

Förderkennzeichen: 02E11849A-J

Impressum

Mit dem vom BMWi und vom NMWK im Vorab der Volkswagenstiftung geförderten Verbundvorhaben TRANSENS wird erstmalig in Deutschland transdisziplinäre Forschung zur nuklearen Entsorgung in größerem Maßstab betrieben. TRANSENS ist ein Verbundvorhaben, in dem 16 Institute bzw. Fachgebiete von neun deutschen und zwei Schweizer Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenarbeiten. TRANSENS lebt vom pluralen Austausch. Die TRANSENS-Berichte spiegeln die Meinung der Autor*innen wider, die nicht mit denjenigen anderer Beteiligter an TRANSENS übereinstimmen müssen.

Kontakt: Dr. Anne Eckhardt, risicare GmbH, Bühlstrasse 19, 8125 Zollikerberg, Schweiz, anne.eckhardt@risicare.ch

TRANSENS-Bericht eingereicht am 12. April 2021, veröffentlicht am 29. Juni 2021.

Review: Dr. Pius Krütli, TdLab des Departements Umweltsystemwissenschaften, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Dr. Peter Hocke, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse am Karlsruher Institut für Technologie; Prof. Dr. Klaus-Jürgen Röhl, Institut für Endlagerforschung der Technischen Universität Clausthal

Zitierweise: Eckhardt, Anne (2021): Stressfaktor Mensch. Menschliche Einflüsse auf das verschlossene Endlager – Versuch einer wissenschaftlichen Annäherung. Zollikerberg. TRANSENS-Arbeitsbericht-03. ISSN (Online): 2747-4186. DOI: 10.21268/20210615-0 <https://doi.org/10.21268/20210615-0>

Vorwort

«Wir aber fliegen weiterhin mit dem Raumschiff Erde etwas planlos durch das All: als selbsternannte Experten und ratlose Laborratten in einem» (Bucheli 2021).

Die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Deutschland ist ein Projekt, bei dem Zukunftsverantwortung im Zentrum steht. Diese Verantwortung soll nicht nur für eine oder zwei nachfolgende Generationen übernommen werden, sondern bis in eine sehr ferne Zukunft hinein reichen.

Zukunftswissen ist zwangsläufig von Ungewissheiten geprägt. Weil sich über die künftige Entwicklung von Menschen, Gesellschaft und Technologie keine gesicherten Aussagen machen lassen, beruht das Projekt Endlagerung auf Phänomenen, die beständig sind und einigermaßen gesicherte Aussagen über künftige Entwicklungen erlauben: Naturgesetze, geologische Formationen, robuste Produkte der Ingenieurskunst. Im tiefen Untergrund sollen die Abfälle fernab von menschlichen Aktivitäten dauerhaft sicher entsorgt werden.

Dennoch bleiben offene Fragen: Wer sind denn die Nachfolger und Nachfolgerinnen, die geschützt werden sollen? Wie werden sie mit dem Endlager umgehen? Wie werden sie «unser» Endlager beurteilen?

Lassen sich für die Sicherheitsbewertung relevante Informationen erzielen, wenn menschliche Aktivitäten vorausgedacht werden? Der TRANSENS-Bericht «Stressfaktor Mensch» ist ein Versuch, diese Frage zu beantworten, spekulativ aber gleichzeitig wissenschaftsbasiert – im Bestreben, weitere Diskussionen zu menschlichen Einflüssen auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers anzuregen.

Inhaltsverzeichnis

1. Stresstest – warum?	7
2. Vorgehen	14
3. Ideenfeld	24
4. Optimierung und Robustheit	57
5. Fazit	68
6. Literaturverzeichnis	70

1. Stresstest – warum?

Aktivitäten zukünftiger Menschen können die Sicherheit eines verschlossenen Endlagers beeinflussen. Daher sollten sie in Sicherheitsbewertungen einbezogen werden, soweit dies sinnvoll möglich ist.

Die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen hat sich über Jahrzehnte hinweg als international anerkannte beste Entsorgungsoption für hochradioaktive Abfälle etabliert. Die Endlagerung wird explizit gewählt, um die Abfälle weitab von menschlichen Lebensräumen dauerhaft und passiv sicher unterzubringen und den Einfluss menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit des verschlossenen Lagers zu minimieren. Neben der Tiefenlage des Endlagers soll vor allem die Weitergabe von Informationen an künftige Generationen Schutz vor unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen in das verschlossene Endlager bieten.

Das Standortauswahlverfahren für ein Endlager in Deutschland ist als lernendes Verfahren angelegt, selbsthinterfragend und offen für Korrekturen (Endlager-Kommission 2016, 23 und 371). Gegenwärtig greifen menschliche Aktivitäten tief in die Umwelt ein. Krisen hinterlassen Spuren in der Gesellschaft, aus denen auch für die Sicherheit von Endlagersystemen gelernt werden kann. Angesichts der Auswirkungen des Klimawandels, der gesellschaftlichen Folgen, die die SARS-CoV-2-Pandemie hinterlassen hat, und weiterer Entwicklungen wie der zunehmenden Kommerzialisierung der Raumfahrt liegt die Frage nahe, ob menschliche Aktivitäten künftig stärker berücksichtigt werden sollen, wenn ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit (§1 StandAG 2017) für ein Endlager gesucht wird.

Die Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für hochradioaktive Abfälle sind auf ein robustes Endlagersystem ausgerichtet. Robustheit bedeutet «Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Störungen» (EndSiAnfV 2020a), also auch Unempfindlichkeit gegenüber Einwirkungen, die auf künftige menschliche Aktivitäten zurückgehen. Die Untersuchung von Risiken und Ungewissheiten, die sich mit künftigen menschlichen Aktivitäten verbinden, kann daher voraussichtlich einen Beitrag dazu leisten, die Robustheit des Endlagersystems zu stärken.

Im Safety Case, dem Berichtswerk, mit dem die Sicherheit und insbesondere auch die Langzeitsicherheit eines Endlagers belegt wird, werden menschliche Einwirkungen auf ein verschlossenes Endlager in Szenarien behandelt.

Szenarien sind Beschreibung möglicher Zukünfte, die Rahmenbedingungen für die Entsorgung setzen. Stellvertretend für direkte menschliche Einflüsse wird im Safety Case das unbeabsichtigte Eindringen in ein Endlager («inadvertent human intrusion») genauer untersucht. Die Bedingungen, unter denen ein solches Eindringen stattfindet, insbesondere die technologischen Möglichkeiten der Zukunft, sind gegenwärtig weder bekannt, noch können sie ermittelt werden. Daher sind die Szenarien des menschlichen Eindringens stilisiert. Die Szenarienentwicklung stützt sich, internationalen Konventionen folgend, auf die gegenwärtige Situation ab. Damit verbleiben zwangsläufig erhebliche Ungewissheiten, die auf fehlende Informationen darüber zurückgehen, wie sich künftige menschliche Aktivitäten auf die Sicherheit des Endlagers auswirken (Eckhardt 2021, 47f).

Bis zum Verschluss des Endlagers in Deutschland werden noch Jahrzehnte verstreichen. Zukunftsorientierte Analysen, Strategien und Konzepte wie Foresight oder Technikfolgenabschätzung sind typischerweise auf einen Zeithorizont von maximal 15 bis 20 Jahren ausgerichtet.

Möglicherweise können sich Methoden der Zukunftsforschung dennoch als hilfreich erweisen, um das Spektrum möglicher anthropogener Entwicklungen und damit auch die anthropogenen Ungewissheiten, die die Langzeitsicherheit von Endlagersystemen betreffen, besser zu verstehen und entsprechende vorsorgliche Maßnahmen zu ergreifen (vgl. Abbildung 1). Dieser Hypothese wird im TRANSENS-Bericht «Stressfaktor Mensch» näher nachgegangen.

Kann Zukunftsforschung einen Beitrag dazu leisten, die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu optimieren?

Abbildung 1: Leitfrage des TRANSENS-Berichts «Stressfaktor Mensch»

Sicherheitsanforderungen an das Endlager

Die Sicherheitsanforderungen an ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Deutschland sind in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndLSiAnfV) festgehalten.

Die EndLSiAnfV bestimmt, dass bei der Bewertung der Sicherheit zwischen zu erwartenden, abweichenden und hypothetischen Entwicklungen zu unterscheiden ist (§3 EndLSiAnfV 2020a). Zu erwartende Entwicklungen treten «sicher oder in der Regel» ein (§3(3) EndLSiAnfV 2020a). International gebräuchlich ist, zu erwartende Entwicklungen zum Beispiel mit «Referenzszenarien» oder «Normalszenarien» abzubilden (NEA 2016, 36). Anhand der zu erwartenden Entwicklungen und Szenarien wird üblicherweise die Einhaltung numerischer Sicherheitskriterien, vor allem von Dosis- oder Risikogrenzwerten, belegt. Der Safety Case zielt zudem darauf ab, zu belegen, dass sich das Endlagersystem mit hoher Wahrscheinlichkeit wie erwartet und beabsichtigt verhalten wird (NEA 2016, 38).

Abweichende Entwicklungen sind wenig wahrscheinlich, könnten aber dennoch eintreten (§3(4) EndLSiAnfV 2020a). International werden Szenarien, die abweichende Entwicklungen repräsentieren, «alternative Szenarien» genannt oder zum Beispiel «zusätzliche Szenarien». Sie umreißen den Raum des realistischerweise Möglichen (NEA 2016, 35f). In der EndLSiAnfV wurde für die abweichenden Entwicklungen ein quantitatives Sicherheitskriterium festgelegt. Aufgrund der geringeren Eintrittswahrscheinlichkeit fällt dessen Wert weniger streng aus als für die zu erwartenden Entwicklungen.

Als sehr unwahrscheinlich, nicht plausibel oder sogar unmöglich eingestufte Entwicklungen dienen dazu, die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen und seine Sicherheit weiter zu optimieren. In der EndLSiAnfV werden Entwicklungen, «die selbst unter ungünstigen

Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind» als hypothetische Entwicklungen bezeichnet (§3(6) EndlSiAnfV 2020a). International wird für diese Kategorie von Szenarien unter anderem die Bezeichnung «What if-Fälle» verwendet (NEA 2016, 36).

Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten wurden in der EndlSiAnfV als zusätzliche Kategorie eingeführt. Es handelt sich dabei um «Entwicklungen, die durch zukünftige menschliche Aktivitäten, insbesondere durch unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, ausgelöst werden können und die für die Sicherheit des Endlagersystems relevant werden können.» Sie sind bei der Optimierung des Endlagersystems und der Überprüfung von dessen Robustheit zu berücksichtigen. Als Referenzentwicklungen dienen Entwicklungen, die «durch derzeit übliche menschliche Aktivitäten ausgelöst werden können» (§3(7) EndlSiAnfV 2020a).

Die Endlagersicherheitsanforderungen erfordern also eine Auseinandersetzung mit künftigen menschlichen Aktivitäten. Generell stellt das Reflektieren künftiger Entwicklungen ein notwendiges Element der verantwortungsvollen Planung und Umsetzung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle dar. Künftige menschliche Aktivitäten können sich beispielsweise in den Genehmigungsvoraussetzungen für ein Endlager der Zukunft niederschlagen und müssen auch aus diesem Grund frühzeitig bedacht werden.

Methode der Szenarienentwicklung

Szenarienentwicklung ist als Methode breit etabliert. Sie unterstützt beispielsweise umwelt- und energiepolitische Entscheidungen oder die Entwicklung von Unternehmensstrategien. Szenarienentwicklung basiert auf wissenschaftlichen Theorien, historischen Erfahrungen, beobachteten Trends sowie Analysen weiterer verfügbarer Informationen. Unabhängig vom Kontext, in dem mit Szenarien gearbeitet wird, wirken bei deren Entwicklung in der Regel logisches Denken, Intuition und kreative Vorstellung zusammen. Der Entwicklungsprozess wird vom Wissen der beteiligten Personen beeinflusst, von Heuristiken und Werthaltungen, Persönlichkeit, Erfahrungen und Interessenlagen (vgl. Abbildung 2). Daher muss ein geeigneter Weg gefunden werden, um mit diesen vielfältigen Einflüssen umzugehen.

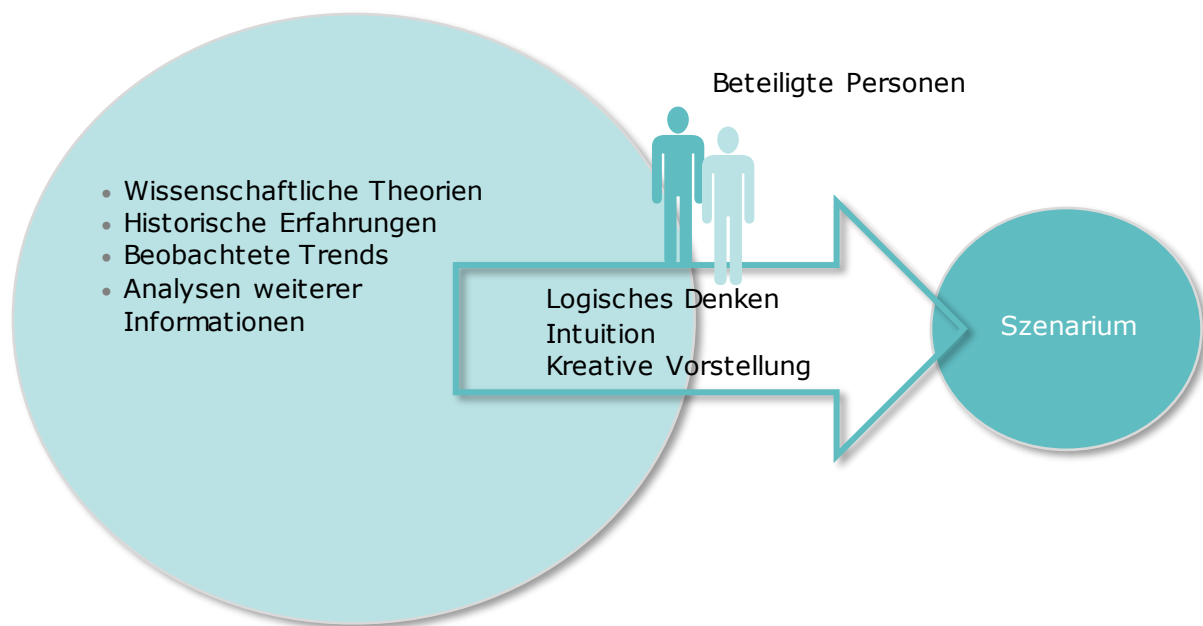


Abbildung 2: Vorgehen bei der Szenarienentwicklung

Zum Prozess der Szenarienentwicklung liefert die Fachliteratur unter anderem folgende Hinweise (nach MacKay & Kiernan 2018, 57f):

- Zeithorizonte festlegen, für die die Szenarien entwickelt werden sollen
- Treiber künftiger Entwicklungen identifizieren
- Zusammenhänge zwischen den treibenden Kräften kartieren
- Cluster bilden und deren Plausibilität einschätzen
- Storylines und daraus Szenarien entwickeln
- Szenarien überprüfen, zum Beispiel auf innere Konsistenz
- Auswirkungen der Szenarien ermitteln

Die so entstehenden Szenarien sind «voraussetzungsvolle Konstruktionen», an die Zeit gebunden, in der sie konstruiert wurden und die Aufgabenstellung, die zu ihrer Konstruktion führte (Neuhaus 2015, 21f).

Anschaulich lässt sich dies am Beispiel einer Szenarienentwicklung aufzeigen, die Mitte der 1990er Jahre in den USA mit etablierten Experten aus verschiedenen Fachdisziplinen durchgeführt wurde (Hora & Winterfeldt 1997). Zu den damals entwickelten Szenarien künftiger gesellschaftlicher Entwicklungen, die die Sicherheit eines Endlagers bedrohen, gehörte auch «Eine feministische Welt» (vgl. Abbildung 3).

<p style="text-align: center;">TABLE 1 Point Scenarios of Possible Future Societies—Boston Team</p>		
Scenario	Year	Description
A feminist world	2091	Women dominate society partially through selection of girl babies. Twentieth century science is discredited as male arrogance. Warnings about repository are dismissed as another example of muddled masculine thinking.

Abbildung 3: Punkt-Szenarium «eine feministische Welt» (Hora & Winterfeldt 1997, 157)

Gegenwärtig würde ein solches Szenarium in den USA vermutlich kaum mehr in Betracht gezogen. Indem es Frauen unterstellt, aufgrund einer pauschalen Ablehnung «männlichen Denkens» wesentliche Gefahren zu ignorieren und den in den 1990er Jahren wie auch heute weltweit verbreiteten Genderzid weiblicher Föten auf Männer zu übertragen, wirkt es frauenfeindlich und zynisch und fügt sich nur schwer in den aktuellen Zeitgeist ein.

Spezielle Herausforderungen für die Szenarienentwicklung bilden neue, unvorhergesehene Entwicklungen, schwache Signale und sogenannte «Wild Cards». Wild Cards sind Ereignisse, die überraschend eintreten, eine geringe Wahrscheinlichkeit aufweisen und weitreichende Auswirkungen nach sich ziehen. Beispiele sind der Fall der Berliner Mauer 1989, die terroristischen Anschläge 9/11 in den USA und der Tsunami-bedingte Reaktorunfall von Fukushima Daiichi 2011. Bei einer speziellen Form der Wild Cards, den «Black Swans», handelt es sich um tatsächlich unvorhersehbare Ereignisse mit erheblichen Auswirkungen. Manchmal lassen sich Black Swans grundsätzlich antizipieren, zum Beispiel das Auftauchen außerirdischer Lebensformen auf der Erde. Wie der Black Swan «Auftauchen außerirdischer Lebensformen auf der Erde» genau aussieht und welche Folgen er nach sich zieht, ist aber nicht vorhersehbar (van Rij 2013, 67f).

Kreative Ansätze tragen nicht nur dazu bei, Entwicklungen aus der komplexen Gegenwart in eine komplexe Zukunft zu extrapolieren, sondern auch dazu, unerwartete Entwicklungen, also Wild Cards oder Black Swans (vgl. zum Beispiel Heinonen 2013), vorwegzunehmen. Der Austausch zwischen Personen mit unterschiedlichem Wissens- und Erfahrungshintergrund erhöht die Chance, Entwicklungen zu identifizieren, die zuvor verborgen geblieben sind.

Künftig werden Zukunftsstudien und Szenarienentwicklungen voraussichtlich zunehmend auf künstlicher Intelligenz beruhen. Mit künstlicher Intelligenz lassen sich unter anderem neue Muster erkennen, die sich in großen Datenmengen herauszubilden beginnen.

Erweiterte Szenarienentwicklung im Safety Case

Im Safety Case nimmt die Auswahl und Ausgestaltung der Szenarien eine zentrale Rolle ein (IAEA 2012, 52). Das Spektrum der möglichen Entwicklungen eines Endlagers, die für die Sicherheit relevant werden können, ist ausgesprochen breit und vielfältig. Eine Herausforderung besteht daher darin, eine Auswahl von wenigen Szenarien zu treffen, die diese Breite und Vielfalt für die Untersuchung der Sicherheit möglichst gut abbilden.

International wird angestrebt, die Szenarienentwicklung im Safety Case systematisch, strukturiert, umfassend, plausibel, konsistent, transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Dafür kommen sowohl Ansätze in Frage, die top-down als auch solche, die bottom-up ausgerichtet sind.

In realen Safety Cases werden meistens beide Ansätze miteinander verbunden. Top-down-Ansätze gehen üblicherweise vom Sicherheitskonzept oder den Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems aus. Als Grundlage für die bottom-up-Entwicklung von Szenarien im Safety Case dienen systematisch strukturierte Kataloge der Merkmale, Ereignisse und Abläufe (features, events and processes, FEPs) in einem Endlagersystem (NEA 2016, 43f, GRS 2014). Diese Kataloge umfassen auch menschliche Aktivitäten, die die Sicherheit eines Endlagers beeinflussen können. Dazu zählen beispielsweise Einflüsse des Menschen auf das Klima, gesellschaftliche und institutionelle Veränderungen, technologische Entwicklungen, Bergbau oder andere Aktivitäten im Untergrund, Wasserbewirtschaftung, Explosionen oder Abstürze und Sanierungsmaßnahmen am Endlager (NEA 2019, 38f).

Der Safety Case soll eine umfassende Sammlung von Belegen für die Sicherheit eines Endlagers umfassen: «The safety case has to include the output of the safety assessment [...], together with additional information, including supporting evidence and reasoning on the robustness and reliability of the facility, its design, the logic of the design, and the quality of safety assessment and underlying assumptions» (IAEA 2011, 30).

Daher kann eine erweiterte Spannbreite von Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten beim Belegen der Sicherheit mehr als nur eine Nebenrolle spielen. Da sich die Grundlagen und Methoden der Szenarienentwicklung laufend weiterentwickeln, müssen Szenarien anthropogener Entwicklungen mit dem Safety Case als Ganzem über den Entsorgungspfad periodisch weiterentwickelt und dem jeweils aktuellen Stand des Wissens angepasst werden.

Möglichkeiten und Grenzen des Stresstests

Die EndlSiAnfV hält in Übereinstimmung mit internationalen Konventionen fest, dass als Referenzentwicklungen für Entwicklungen auf der Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten Entwicklungen dienen sollen, die durch derzeitige menschliche Aktivitäten ausgelöst werden können (§3(7) EndlSiAnfV 2020a). Menschliche Aktivitäten zu betrachten, die über die derzeit üblichen hinausgehen, ist damit nicht ausgeschlossen.

Solche Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten dürfen jedoch nicht zu spekulativ sein. Kein Endlagerkonzept wird in der Lage sein, die Sicherheitsanforderungen bei allen denkbaren Einwirkungen aufgrund menschlicher Aktivitäten zu erfüllen. Ein Szenarium künftiger menschlicher Aktivitäten, bei dem das Lager beim Versuch, eine außerirdische Invasion abzuwehren, beschädigt wird, ist daher ebenso wenig zur Optimierung eines Endlagers geeignet wie ein Szenarium, bei dem Anhänger*innen einer künftigen Weltreligion das Endlagersystem als unterirdische Kathedrale ausbauen. Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten müssen vielmehr nachvollziehbar entwickelt, argumentativ prüfbar und in sich konsistent sein (Grunwald 2013). Plausibilität und Konsistenz sind aus heutiger Perspektive zu beurteilen, weil künftige Perspektiven noch nicht zugänglich sind.

Plausible und konsistente Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten lassen sich im Sinn eines «Stresstests» nutzen, um die Belastbarkeit eines Endlagersystems zu untersuchen. Sie eignen sich dazu, die Auslegung des Endlagers zu optimieren und die Robustheit des Endlagersystems zu überprüfen. Im gesellschaftlichen Diskurs veranschaulichen sie die potentiellen Auswirkungen menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit eines Endlagersystems.

Angesichts des langen Entsorgungspfads lässt sich argumentieren, dass ein solcher Stress-test noch verfrüht sei und es ausreichen würde, spätere menschliche Einwirkungen erst unmittelbar vor dem Verschluss des Endlagers in Betracht zu ziehen. Der zeitliche Horizont, über den sich heute noch einigermaßen plausible Szenarien künftiger gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen anstellen lassen, liegt weit vor dem Ende des Entsorgungspfads.

Andererseits lässt sich aber auch argumentieren, dass die Sicherheit des Endlagers immer auf der Basis des gegenwärtigen Wissens konzipiert wird und werden muss. Ebenso wie in den kommenden Jahrzehnten voraussichtlich neue Erkenntnisse zur Behälterkorrosion und zur Perkolation in Steinsalz gewonnen werden, werden sich auch neue Erkenntnisse zu künftigen menschlichen Aktivitäten entwickeln. Zudem dürfen auch Pfadabhängigkeiten nicht außer Acht gelassen werden: Zu Beginn eines Entsorgungspfads werden wichtige Weichen gestellt, auf die später nur noch schwer zurückgekommen werden kann. Umso wichtiger ist es, bereits zu Beginn des Entsorgungspfads auch die künftigen menschlichen Aktivitäten ausreichend zu berücksichtigen.

2. Vorgehen

Der Entwicklung von Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten im Stresstest liegt ein systematisches Vorgehen zugrunde, das sich auf ein breites Spektrum von Quellen stützt.

Der Stresstest beruht auf Szenarien, in denen menschliche Aktivitäten dazu führen, dass die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigt wird. Anhand dieser Szenarien wird überprüft, ob sich Anhaltspunkte für eine Optimierung des Endlagersystems abzeichnen. Die Szenarien sollen plausibel und inhaltlich konsistent sein sowie ein breites Spektrum gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen abdecken (vgl. Abbildung 4).

Der Szenarienentwicklung liegen vier Annahmen zugrunde (vgl. Abbildung 4):

- Das Endlager ist bereits verschlossen.
- Es erfüllt alle im Jahr 2021 geltenden Sicherheitsanforderungen.
- Der Zeithorizont der Szenarienentwicklung beträgt ungefähr hundert Jahre. In diesem Zeitraum setzt das Szenarium ein. Die Radionuklide befinden sich demnach noch innerhalb der technischen und geotechnischen Barrieren. Die Zeitspanne, bis es zu Schäden an Menschen und Umwelt kommt, kann unterschiedlich ausgeprägt sein.
- Die vorherrschenden gesellschaftlichen Werthaltungen unterscheiden sich nicht fundamental von denjenigen im Jahr 2021 in Deutschland.

Die Szenarien basieren auf heute bekannten Tatsachen bzw. absehbaren Entwicklungen. Es wird also explizit nicht der Anspruch erhoben, in eine ferne, bis 10'000 Jahre reichende Zukunft vorzublicken (Hora & Winterfeldt 1999). Zudem wird auch nicht der Anspruch erhoben, sich auf anthropologische Konstanten abzustützen. Gegen die Existenz von anthropologischen Konstanten sprechen sowohl Überlegungen zum Menschen als biologischer Art als auch zum Menschen als Seinsweise (Gruevska & Lessing 2020, Kehl & Coenen 2016, Buser 2010).

Die Unterscheidung zwischen «beabsichtigtem» und «nicht-beabsichtigtem» Eindringen ist aus ethischer Perspektive relevant, lässt sich aber nicht immer eindeutig vornehmen (Eckhardt 2021, S. 56f). Daher werden sowohl Szenarien des beabsichtigten als auch des nicht-beabsichtigten Eindringens betrachtet.

Ausgeschlossen sind Szenarien, die zu extrem schweren katastrophalen Schäden führen (vgl. Abbildung 4). Beispiele für solche Szenarien wären die Explosion einer großen Kernwaffe (Massenvernichtungswaffe), der Absturz eines Meteoriten mit einem Durchmesser von mehreren Hundert Metern, ein außerordentlich starker Sonnensturm oder ein schwerer Unfall mit Antimaterie. Obwohl vergleichbare Ereignisse teilweise in der Vergangenheit bereits eingetreten oder auf der Grundlage des gegenwärtigen Wissens denkbar sind, wurden sie nicht berücksichtigt, weil die Schäden, die in diesen Fällen entstehen, so schwer wiegen, dass die Situation des Endlagers nicht isoliert, sondern im Kontext des Gesamtereignisses betrachtet werden muss.

Manche Szenarien sind nicht für alle Endlagerkonzepte gleichermaßen relevant und beispielsweise für ein Wirtsgestein oder einen bestimmten Behältertyp plausibler als für andere. Vorerst wurde hier aber noch keine Differenzierung vorgenommen, und eine genauere natur- und ingenieurwissenschaftliche Prüfung der Relevanz der Szenarien steht ebenfalls aus. Aus dem in Kapitel 3 aufgespannten Ideenfeld, das alle entwickelten Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten umfasst, werden daher auch nur generelle Empfehlungen abgeleitet und keine konkreten, ins Detail gehenden Maßnahmenvorschläge entwickelt.

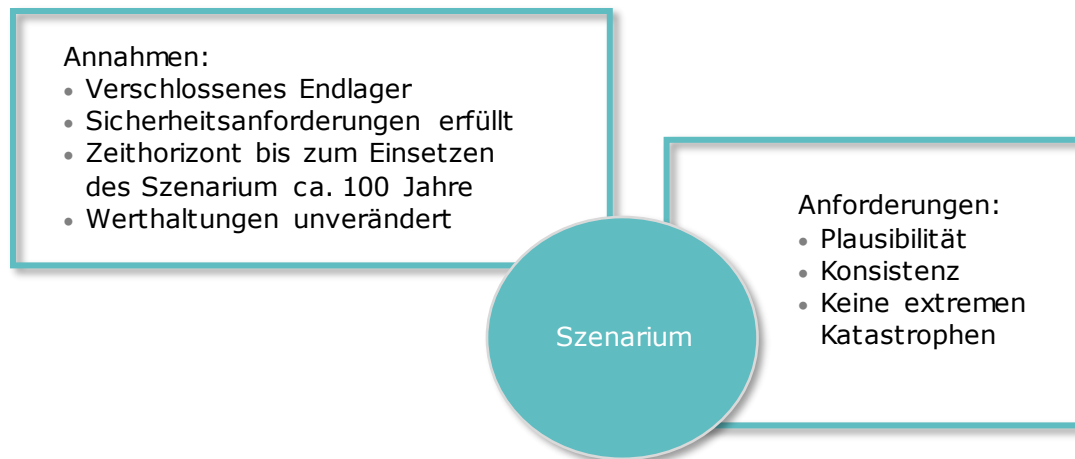


Abbildung 4: Merkmale der Szenarien

Die Entwicklung der im Ideenfeld vorgestellten Szenarien folgt methodisch am ehesten der «Punkt-Szenarien-Technik» (Hora & Winterfeldt 1997, 156). Bei der Punkt-Szenarien-Technik werden spezifische Szenarien ausgearbeitet, die jedes für sich eine eigene in sich konsistente Geschichte erzählen. Ideen für die Entwicklung der Punkt-Szenarien lieferten vor allem Fachliteratur aber auch Science-Fiction. Ein Nachteil der Punkt-Szenarien-Technik ist, dass die entwickelten Szenarien keinen Anspruch darauf erheben können, den Raum der möglichen Zukunftsentwicklungen vollständig abzudecken (Hora & Winterfeldt 1997, 157).

Daher wurde die Punkt-Szenarien-Technik mit einem systematischen Ansatz kombiniert, der sich an möglichen physikalischen, chemischen und biologischen Einwirkungen auf das Endlager, Treibern und Trends sowie Zukunftserzählungen ausrichtet. Die Entwicklung der Szenarien im Ideenfeld beruht auf Technikfolgen-Abschätzungen, vor allem aus dem Bereich der Politikberatung, Quellen aus der Risiko- und Zukunftsforschung, Fachliteratur zur Entsorgung radioaktiver Abfälle und Werken der Science-Fiction. In die Szenarientwicklung gingen zudem Erfahrungen der Autorin, die seit 25 Jahren wiederholt im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle gearbeitet hat, ein (vgl. Abbildung 5).

Durch das Einbeziehen weiterer Personen als transdisziplinäre Forschungspartner könnte die Entwicklungen von Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten voraussichtlich erheblich erweitert und bereichert werden.

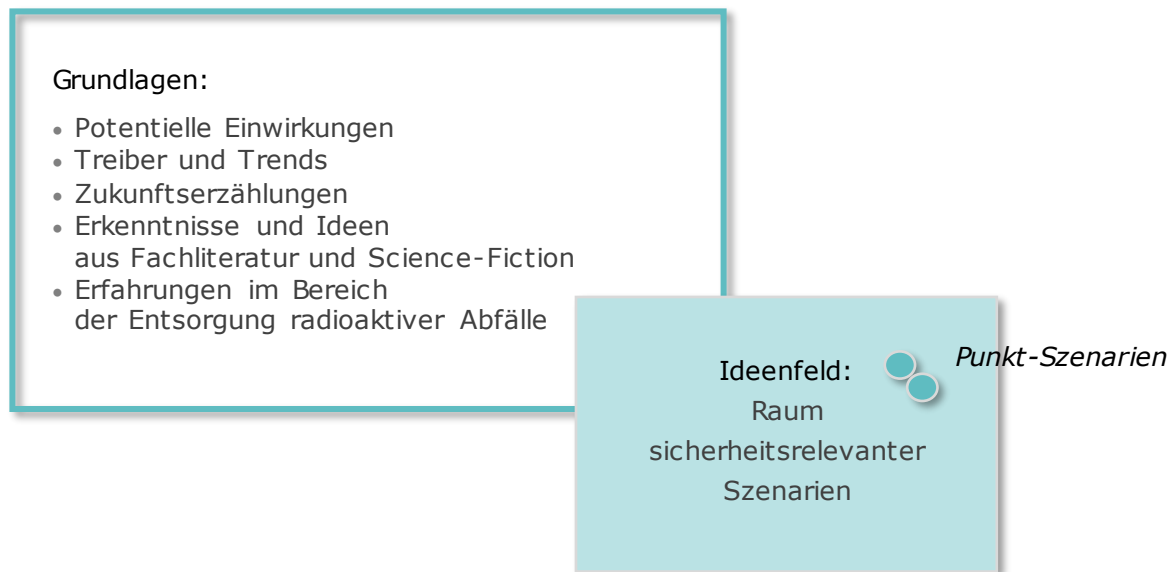


Abbildung 5: Vorgehen bei der Entwicklung des Ideenfelds

Systematischer Ansatz

Wird die Szenarienentwicklung systematisch angegangen, so lassen sich physikalische, chemische und biologische Einwirkungen identifizieren, die die Sicherheit eines Endlagers beeinflussen können. Treiber und Trends führen zu solchen Einwirkungen oder verstärken sie.

Physikalische, chemische und biologische Einwirkungen

Grundlegende Ansätze menschlicher Einwirkungen, die ein Endlager schädigen können, zeigt Abbildung 6. «Erhebliche Krafteinwirkungen» können von der Erdoberfläche aus (zum Beispiel Absturz eines großen Weltraumfahrzeuges) oder mehr oder weniger oberflächennah (zum Beispiel unterirdische Explosion) erfolgen.

«Schleichende Zerstörung» bezeichnet durch Menschen hervorgerufene oder vorangetriebene Prozesse, die sich allmählich ausbreiten oder fortbewegen, bis sie schließlich das Endlager erreichen und dessen Sicherheitsfunktionen beeinträchtigen (zum Beispiel die Entstehung und Ausbreitung neuer Kluftsysteme).

Ein Eindringen ins Endlager durch Menschen oder autonome, von Menschen konstruierte Maschinen kann nicht nur von der Erdoberfläche aus erfolgen (zum Beispiel, wenn das Endlager saniert werden soll), sondern auch horizontal (zum Beispiel beim Bergwerksbau).

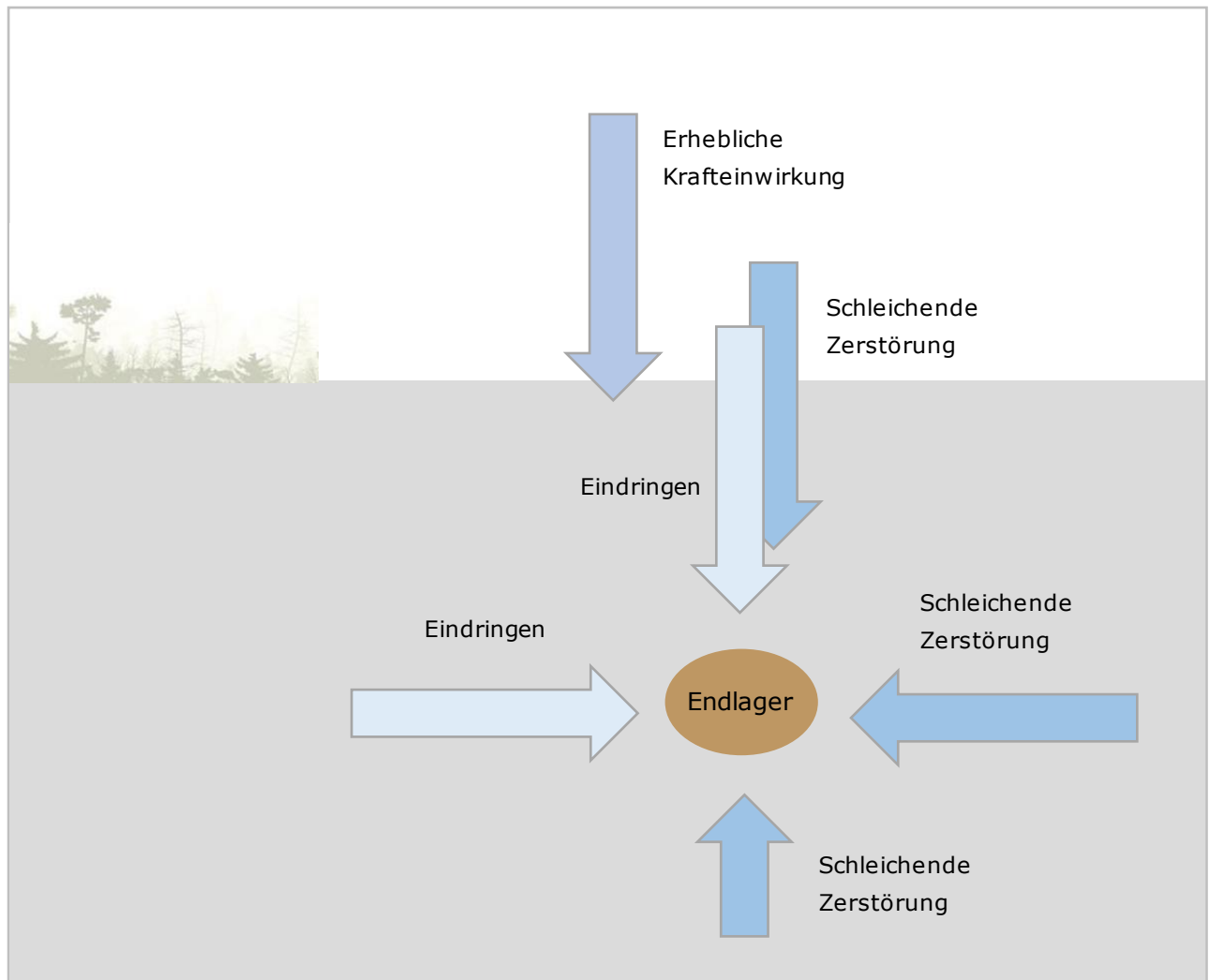


Abbildung 6: Einwirkungen, die die Sicherheit eines Endlagers beeinträchtigen können (Teil der Abbildung entnommen aus Stahlmann et al. 2015, 27)

Bei einigen der im Ideenfeld beschriebenen Szenarien ist nicht nur eine dieser Einwirkungen beteiligt, sondern es werden verschiedene Einwirkungen kombiniert.

Treiber und Trends

Einflüsse, die sicherheitsrelevante menschliche Aktivitäten hervorrufen oder verstärken, werden als «Treiber» bezeichnet. Mögliche Treiber menschlicher Aktivitäten, die dazu führen können, dass die Sicherheit eines verschlossenen Endlagers beeinträchtigt wird, sind (in alphabetischer Reihenfolge):

- Entwicklung und Anwendung neuer Technologien
- Mangel an Rohstoffen und Energie
- Politische Kontroversen um die Sicherheit des Endlagers
- Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik
- Schwere gesellschaftliche Konflikte
- Schwere Naturereignisse

- Streben nach neuen Erkenntnissen
- Überbevölkerung, Migration, Mangel an Raumreserven
- Umweltveränderungen, Klimawandel
- Verfall staatlicher Ordnung, Entstehung rechtsfreier Räume
- Wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds

Einige dieser Treiber sind gegenwärtig in der Literatur sehr präsent, zum Beispiel der Klimawandel. Andere werden seltener angesprochen, zum Beispiel die Entstehung rechtsfreier Räume im Umfeld eines Endlagers.

In die Szenarienentwicklung wurden zudem Trends einbezogen, die in der aktuellen Zukunftsforschung eine Rolle spielen. Treiber und Trends lassen sich nicht immer eindeutig gegeneinander abgrenzen.

Trends, die der Szenarienentwicklung zugrunde liegen, sind (ebenfalls in alphabetischer Reihenfolge): Automatisierung und Robotik, Digitalisierung, Energiewende, Globalisierung, Individualisierung, Klimaanpassung, Kommerzialisierung der Raumfahrt, Konvergenz von Biologie und Technik, Kreislaufwirtschaft, Mobilität, nachhaltige Entwicklung, Urbanisierung, Umweltschutz und Weiterentwicklung der Kerntechnik weltweit.

Zukunftserzählungen

Zukunftsstudien beruhen wesentlich darauf, bereits erkennbare Entwicklungen zu analysieren und daraus mögliche Ereignisse und Entwicklungen in der Zukunft abzuleiten. Manchmal werden auch schwache Signale von Entwicklungen, die sich gerade erst abzeichnen beginnen oder bisher kaum wahrgenommen wurden, aufgespürt und deren Bedeutung für die Zukunft eingeschätzt.

Entwicklungen, vergangene und zukünftige, lassen sich erzählen. Der Übergang von «Entwicklungen» zu «Narrativen» ist daher fließend. Narrative stellen Zusammenhänge in Ereignisabfolgen her, lenken die Aufmerksamkeit auf bestimmte Aspekte und enthalten moralische Botschaften (Roßmann & Berg 2021). Die verbreitete normative Prägung von Zukunftswissen (Grunwald 2007, 54) wird im Narrativ sinnstiftend genutzt.

Das Feld der Zukunftserzählungen, -geschichten, -bilder, und -narrative, die für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle relevant sind, ist weit. Erzählungen, Geschichten, Bilder und Narrative lassen sich oft nicht eindeutig gegeneinander abgrenzen. Endlagerspezifische Narrative werden in TRANSENS eingehender untersucht, vor allem im Hinblick auf die «verwickelte» Kommunikation rund um die Entsorgung hochradioaktive Abfälle (Brunnengräber & von Hirschhausen 2021).

Als Grundlage für die Ermittlung der im Ideenfeld dargestellten Szenarien dienen einige Erzählungen, die im Zusammenhang mit der Endlagerung regelmäßig beigezogen werden oder derzeit Gegenstand von Technikfolgen-Abschätzungen, Zukunftsstudien oder Science-Fiction sind. Angesprochen werden nur Erzählungen, die für die Sicherheit eines verschlossenen Endlagers relevant sein könnten.

Von Szenarien unterscheiden sich Zukunftserzählungen dadurch, dass sie generischer und weniger detailreich sind. Im Folgenden werden neun Zukunftserzählungen vorgestellt, die der Szenarienentwicklung im Ideenfeld zugrunde liegen.

«Fortschreibung der Gegenwart»

«Die Gegenwart wirkt ohne tiefgreifende Veränderungen in die Zukunft weiter.» Implizit gehen viele Menschen von diesem Entwurf aus, wenn sie in die Zukunft vorausdenken. In industrialisierten Ländern wie Deutschland, in denen erhebliche Teile der Bevölkerung ein hohes Maß an Wohlbefinden und Wohlstand erreicht haben, erscheint die Fortschreibung des Status quo vielfach als selbstverständlich erwünschte Option.

Veränderungen werden aufgrund von Risikoaversion als nicht erstrebenswert betrachtet. Bei Risikoaversion werden die mit einer Veränderung möglicherweise verbundenen Verluste als dermaßen unerwünscht beurteilt, dass sie die Chance auf Gewinne nicht aufwiegen.

Im Ideenfeld, das im folgenden Kapitel beschrieben ist, wird die Gegenwart sinngemäß zum Beispiel in den Szenarien «Drift into failure» oder «Fehlalarm» fortgeschrieben.

«Fortschritte der Menschheit»

In Utopien werden erstrebenswerte aber nicht realistischerweise erreichbare Zukünfte dargestellt. In Deutschland dürfte die Mehrheit der Menschen gegenüber Utopien positiv eingestellt sein,

- die auf Freiheit, Gleichheit und Gerechtigkeit ausgerichtet sind,
- die Sicherheit versprechen und damit unter anderem wenig Kriminalität und die Abwesenheit tiefgreifender gesellschaftlicher Konflikte,
- bei denen technologischer Fortschritt allen Menschen ein langes Leben, Wohlbefinden und Wohlstand ermöglicht und
- bei denen Menschen und Umwelt nachhaltig miteinander koexistieren.

Im Kontext der Entsorgung radioaktiver Abfälle wird seit Jahrzehnten mit dem Gegensatzpaar «(technologischer) Fortschritt» und «(technologischer) Niedergang» gearbeitet. Manche Autoren reflektieren auch einen Wechsel von Fortschritt und Niedergang (Hora & Winterfeldt 1997).

Viele Szenarien im Ideenfeld setzen eine technologische Weiterentwicklung voraus. Gesellschaftliche Utopien klingen vor allem beim Szenarium «Blumenkinder» an, erweisen sich dort jedoch als nicht-sicherheitsgerichtet.

«Neuland Untergrund»

Ebenso wie das weiter unten angesprochene Weltall verspricht der geologische Untergrund Zugang zu neuen räumlichen, stofflichen und energetischen Ressourcen. Dichtbesiedelte

Länder wie die Niederlande (TNO 2020) und die Schweiz (EGK 2021) befassen sich intensiver mit der Erschließung des Untergrunds und dem künftigen Ausgleich von Schutz- und Nutzungsinteressen, von denen einige in Abbildung 7 dargestellt sind.

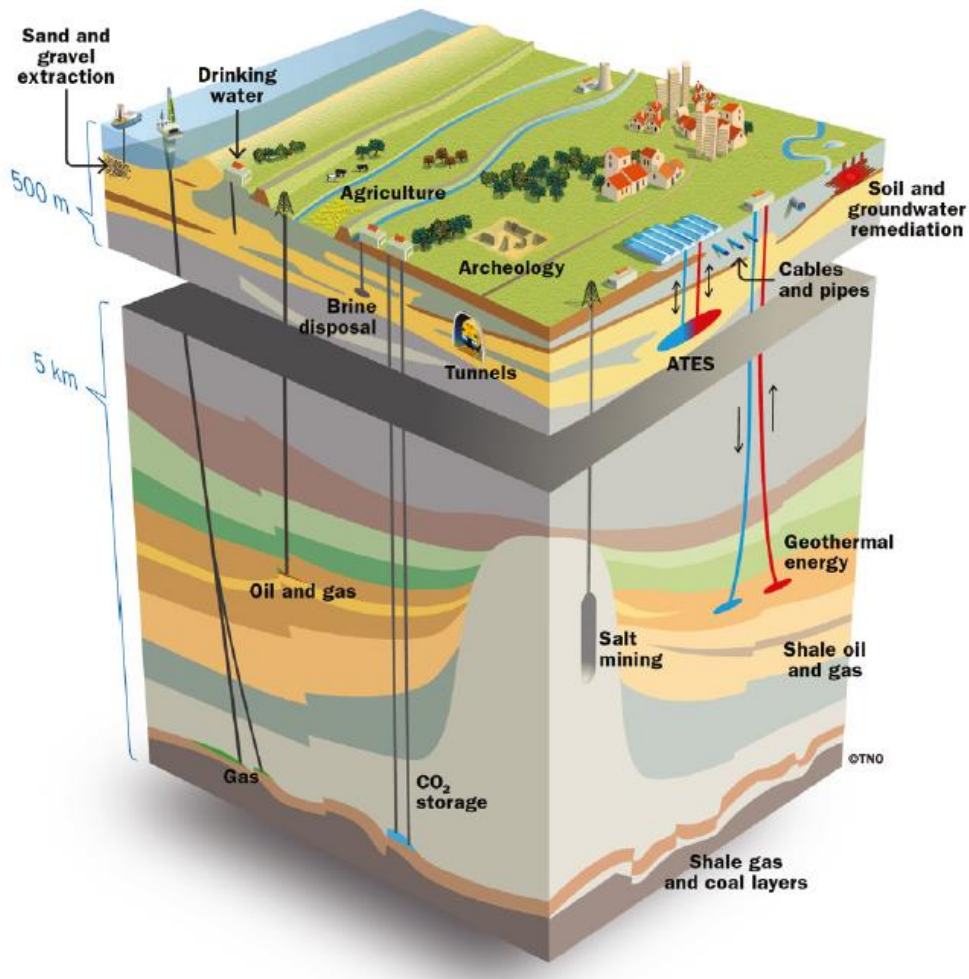


Abbildung 7: Schutz und Nutzung im Untergrund. Aktuelle Übersicht aus den Niederlanden (TNO 2020). Die Abkürzung ATES steht für Aquifer-Wärmespeicher

Visionäre Projekte wie sie in den USA durch Elon Musk mit The Boring Company (TBC 2021) und in der Schweiz von Cargo sous terrain (CST 2021) vorangetrieben werden, finden mediale und politische Aufmerksamkeit. Knappe Raumreserven an der Erdoberfläche, Bedarf an stofflichen und energetischen Ressourcen und die Notwendigkeit, sich dem Klimawandel anzupassen, beschleunigen die Tendenz, den Untergrund vermehrt zu nutzen.

Diese Erzählung wird im Ideenfeld vor allem im Szenarium «Darwinismus im Untergrund» aufgegriffen, spiegelt sich aber auch in anderen Szenarien wider, zum Beispiel im Szenarium «Riss-System».

«Besiedlung des Weltalls»

Das Weltall eröffnet Menschen die Möglichkeit, in faktisch unendliche, bisher weitgehend unbekannte Räume vorzudringen. Räumliche, energetische und stoffliche Ressourcen sind im Weltall unbegrenzt vorhanden. Zudem bietet zumindest der Nachbarplanet Mars eine Chance, ggf. einer unbewohnbar gewordenen Erde zu entfliehen.

Nach den fatalen Unfällen der US-amerikanischen Space-Shuttles Challenger (1986) und Columbia (2003) ist die Euphorie, die durch die ersten bemannten Mondlandungen ab 1969 ausgelöst worden war, weitgehend verfliegen. Aktuell wird sie vor allem durch private Unternehmen wie SpaceX wiederbelebt. SpaceX ist nicht nur Hersteller und Betreiber von Satelliten, sondern verfolgt auch das Ziel, den Mars zu besiedeln (SpaceX 2021).

Die UNO hat mit Weltraumverträgen bereits einen völkerrechtlichen Rahmen für solche Vorhaben entwickelt. Einige Staaten haben nationale Weltraumgesetze erlassen. Luxemburg hat eine Agentur gegründet, um künftig eine führende Rolle bei der Nutzung des Weltalls einnehmen zu können (ITA AIT 2019, 032).

Die Eroberung des Weltalls könnte dazu führen, dass das Interesse am geologischen Untergrund mit seinen räumlichen, stofflichen und energetischen Ressourcen schwindet. Eventuell reift langfristig der Entschluss, das Endlager zu räumen und die Abfälle stattdessen an einem «sichereren Ort» im Weltall abzulagern.

Im Szenarium «Absturz» steht ein Unfall mit einem Weltraumfahrzeug im Zentrum.

«Transhumanismus und neue Lebensformen»

Der Philosoph Hans Jonas fordert, dem «Prinzip Verantwortung» folgend, «echtes menschliches Leben auf Erden» permanent zu erhalten (Metzler oJ). Angesichts neuer technologischer Entwicklungen wird die Frage, was «echtes menschliches Leben» ausmacht zurzeit ethisch intensiv diskutiert. Ein wichtiges Deutungsmuster der Konvergenz von Menschen und Maschinen, wie sie bereits in der Verbindung von Neurotechnologien und Künstlicher Intelligenz sichtbar wird, ist der Transhumanismus, der eine tiefgreifende Veränderung von Menschsein anstrebt (Kehl & Coenen 2016, 7f). Das Mängelwesen Mensch, das in der philosophischen Anthropologie immer wieder aufscheint (Gruevska & Lessing 2020), strebt mit Hilfe seiner eigenen Produkte danach, seine natürlichen Beschränkungen – wie einen Körper und eine Psyche, die es nicht selbst gewählt hat, seine individuelle geistige Leistungsfähigkeit oder den Tod – zu überwinden, die Erde zurückzulassen und sich im Universum zu entfalten (Kehl & Coenen 2016, 8f).

In der Biomedizin verschieben sich Grenzen zwischen Gesundheit und Krankheit, neue technologische Entwicklungen führen dazu, dass Menschen ihre eigene biologische Konstitution stärker selbst mitgestalten können. Gestalten lassen sich auch andere Organismen, etwa mit Hilfe der Synthetischen Biologie, die es bereits erlaubt, einfache Lebensformen von Grund auf zu konzipieren und zu realisieren. Biobots, bei denen sich biologische und technische Elemente funktional eng verbinden, sind vor allem beim Zusammenwirken von Bioelektronik und Insekten bereits Realität (vgl. zum Beispiel Heller 2016). Vollkommen spekulativ, aber über den Bewertungszeitraum für die Sicherheit eines Endlagers nicht

grundsätzlich auszuschließen ist das Vorkommen bisher unbekannter außerirdischer Lebensformen, die beispielsweise infolge der Besiedlung des Mars auf die Erde gelangt sind.

Transhumanismus und neue Lebensformen stehen beim Szenarium «Menschheit 2.0» im Mittelpunkt.

«Demokratieverlust»

Beispiele für die Schwächung und den Niedergang von Demokratien lassen sich weltweit beobachten. Die Regierung durch das Volk wird abgelöst von autoritären Systemen, die durch politische Ideologien motiviert sind, religiöse Überzeugungen und Machtstreben einzelner bzw. bestimmter Gruppen. Oft wird dabei der Anschein von Demokratie aufrechterhalten, die Demokratie aber faktisch zum Beispiel durch manipulierte Wahlen untergraben. Entwicklungstendenzen, die Demokratie schwächen können, sind Neotribalismus, also die Tendenz, sich in spezifischen Gruppen gegenüber anderen Gruppen der Gesellschaft abzugrenzen, und der Einfluss großer, international agierender Unternehmen.

Science-Fiction setzt häufig einen Demokratieverlust voraus. Der Filmklassiker «Blade Runner» kombinierte zum Beispiel die Zukunftserzählungen «Demokratieverlust», «Transhumanismus und neue Lebensformen», «Besiedlung des Weltalls» und «Verseuchte Welt» – im Jahr 1982 vorausschauend auf 2019. Viele dystopische Erzählungen handeln von Demokratieverlust, zum Beispiel der Roman «1984» von George Orwell.

Im Stresstest wird davon ausgegangen, dass sich die vorherrschenden gesellschaftlichen Werthaltungen nicht fundamental von denjenigen im Jahr 2021 in Deutschland unterscheiden. Daher spiegelt sich Demokratieverlust pointiert nur in einem Szenarium im Ideenfeld wider, den «TECTribes».

«Niedergang der Menschheit»

Der Niedergang der Menschheit ist eine der Erzählungen, die im Zusammenhang mit der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle regelmäßig angesprochen werden. Sie orientiert sich an Erfahrungen aus der Vergangenheit, zum Beispiel der Ablösung der Antike durch das «finstere Mittelalter», sowie an Krisenszenarien für die Zukunft, zum Beispiel einem weltumspannenden ökologischem Kollaps (vgl. auch «Verseuchte Welt») oder einem dritten Weltkrieg.

Für die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle gilt dieses Szenarium bei vielen Spezialisten und Spezialistinnen als wenig relevant, weil eine Menschheit, die über wenig Wissen und Kompetenzen verfügt, kaum in ein Endlager im tiefen geologischen Untergrund vordringen würde. Ein Szenarium, bei dem dies dennoch der Fall ist, wird unter dem Titel «Verzweifelte Suche» behandelt. Zudem setzen sich einige Szenarien mit gesellschaftlichen Konflikten und Umweltschäden auseinander. Im Szenarium «Deinococcus habilis» wird eine Entwicklung skizziert, die von stark ausgeprägter Vorsorge zur Vernachlässigung der Endlagersicherheit führt.

«Krieg und Konflikt»

Atomare, biologische, chemische und nukleare Massenvernichtungswaffen sind dazu geeignet, extrem weitreichende Schäden hervorzurufen und ggf. ganze Nationen zu vernichten. Das letzte Weißbuch der deutschen Bundesregierung zur Sicherheitspolitik (2016) zeichnet ebenso wie vergleichbare Dokumente aus anderen Ländern (Bundesrat 2021) ein vielschichtiges Bild äußerer und innerstaatlicher Konflikte, von Bedrohungslagen und unterschiedlichen Formen, Konflikte auszutragen. Vor diesem Hintergrund stellt die Bundesregierung für die Gegenwart eine «nie da gewesene Parallelität und Größenordnung von Krisen und Konflikten» fest (Bundesregierung 2016, 137). Kernanlagen gegen alle derzeit möglichen Waffeneinwirkungen so auszulegen, dass die Sicherheitsanforderungen eingehalten werden, ist nicht möglich (Neumann et al. 2018) – auch nicht bei einem Endlager.

In Romanen und Filmen sind und waren Kriege und Konflikte, die die Menschheit unter Umständen mit tiefgreifend veränderten Lebensbedingungen zurücklassen, ein verbreitetes Thema. Ein Beispiel ist der Film «The Day After – Der Tag danach», der zu Beginn der 1980er Jahre die Auswirkungen eines Krieges zeigt, bei dem Nuklearwaffen in den USA zum Einsatz kommen.

Die Zukunftserzählung «Krieg und Konflikt» wird in den Szenarien «Hybrider Angriff» und «Organisierter Gewaltkonflikt» direkt aufgegriffen.

«Verseuchte Welt»

In der Science-Fiction-Literatur und -Filmen sind Erzählungen zu chemischen oder biologischen Agenzien, die die Welt bedrohen, verbreitet. Nanotechnologie, Gentechnik und synthetische Biologie liefern Anhaltspunkte für Erzählungen, die beispielsweise von winzigen selbstreplizierenden Maschinen oder außer Kontrolle geratene tödliche Viren handeln (Zukunftsinstitut 2012). In manchen Erzählungen erstickt die Menschheit an ihren eigenen Hinterlassenschaften und Abfällen wie im Film WALL·E aus dem Jahr 2008. Näher an realen Ereignissen bewegen sich Narrative zu radioaktiven Wildschweinen im Umfeld der zerstörten Reaktoren von Fukushima Daiichi oder giftresistenten städtische Ratten (Hegglund 2020, 29). In der Sperrzone um den zerstörten Reaktorblock des Kernkraftwerks Tschernobyl breiten sich zwischen verfallenden Hinterlassenschaften der ehemaligen Bewohner neue natürliche Lebensgemeinschaften aus, die ursprünglich wirken (Arte 2010).

Die Zukunftserzählung «Verseuchte Welt» wird im Szenarium «Ökokollaps» aufgegriffen.

3. Ideenfeld

Das Ideenfeld ist ein Szenarienraum, in dem Auswirkungen künftiger menschlicher Aktivitäten auf die Sicherheit eines Endlagersystems ausgelotet werden.

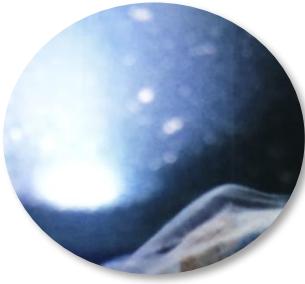
Das Ideenfeld zum Stresstest umfasst 25 Szenarien, die alphabetisch nach Namen angeordnet sind. Die Szenarien sollen dazu beitragen, den Raum künftiger anthropogener Entwicklungen zu umreißen, die sich auf die Sicherheit des verschlossenen Endlagers auswirken, also insbesondere auf die Barrieren und die Sicherheitsfunktionen. Daher wurde Diversität der Szenarien in Bezug auf gesellschaftliche Rahmenbedingungen, Technologieentwicklung, Informationsstand zum Endlager und Herausforderungen für das Sicherheitskonzept des Endlagers angestrebt.

In den Szenarien werden die zu erwartenden Schäden skizziert und die Plausibilität des Szenariums in eine von drei Kategorien eingeordnet. Jedes Szenarium wird mit einigen Überlegungen zu Ansätzen abgeschlossen, die die soziotechnische Robustheit des Endlagers stärken. Dabei handelt es sich um Vorschläge, die direkt auf das Endlagersystem ausgerichtet sind. Weiter gehende Ansätze könnten beispielsweise sicherheits- und umweltpolitische Strategien umfassen, die unter anderem auch der Sicherheit des Endlagers zugute kommen. Eine Auswertung des Ideenfelds wird im nachfolgenden Kapitel Optimierung und Robustheit vorgenommen.

Abbildung 8 vermittelt eine Übersicht über zentrale Themen der Szenarien:



Abbildung 8: Zentrale Themen der Szenarien im Ideenfeld



Absturz

- Die Barrieren des Endlagers werden beim Absturz eines großen Weltraumfahrzeugs beschädigt.

Szenarium: Ein Weltraumfahrzeug für interplanetaren Verkehr mit erheblicher Frachtkapazität stürzt kurz nach dem Start auf die Erdoberfläche über dem Endlager ab. Durch die außergewöhnlich große Kraft, die auf die Erdoberfläche einwirkt, wird auslegungsüberschreitend Energie auf das Endlagersystem übertragen. In früheren Szenarienentwicklungen wurde auch über ein Kriegsweltraumschiff nachgedacht, das den Absturz vergeblich durch Abfeuern von Strahlung in den Untergrund abzubremesen versucht und damit die Schäden im Untergrund noch verstärkt.

Andere Ursache einer solchen unbeabsichtigten Krafteinwirkung könnten der Einschlag eines Meteoriten sein oder eine verheerende Explosion bei der Lagerung von Chemikalien. Das Szenarium weist Ähnlichkeiten zu Szenarien auf, bei denen Kernwaffen oder andere Waffen mit stark explosiver Wirkung zum Einsatz kommen.

Die übertragene Energie führt zu Schäden an den Barrieren des Endlagers und beeinträchtigt die Sicherheitsfunktionen, so dass die ursprünglichen Sicherheitsanforderungen nicht mehr eingehalten werden können. In extremen Fällen könnten Radionuklide zeitnah in die Biosphäre eingetragen werden. Wahrscheinlicher ist, dass Schäden an Menschen und Umwelt, die auf das Endlager zurückzuführen sind, erst mit zeitlicher Verzögerung auftreten.

Merkmale: Im Zentrum des Szenariums steht ein Entwicklungsschub der Raumfahrt. Das Szenarium wird vom Informationsstand beeinflusst. Information zum Endlager unterstützt Vorsorge, zum Beispiel durch Wahl von Flugrouten abseits des Endlagerstandorts, und Bewältigung. Der Absturz eines großen Weltraumfahrzeugs setzt einen weiteren technologischen Fortschritt voraus und gesellschaftliche Entwicklungen, die den Einsatz von erheblichen Ressourcen für ein solches Vorhaben rechtfertigen. Aus heutiger Perspektive ist zu erwarten, dass an Weltraumfahrzeuge der Zukunft hohe Sicherheitsanforderungen gestellt werden. Wenn eine Krise Weltraumverkehr notwendig macht, zum Beispiel, weil die Erde sich als zunehmend unbewohnbar erweist, würden Sicherheitsanforderungen ggf. relativiert. Denkbar ist auch, dass es bei der Kommerzialisierung der Weltraumfahrt aufgrund aggressiver Konkurrenz zu Sicherheitseinbußen kommt. Die Plausibilität des Szenariums wird daher als mittel eingeschätzt. Das Szenarium folgt der Zukunftserzählung «Besiedlung des Weltalls».

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Optimierung der Barrieren im Hinblick auf das Abdämpfen von Krafteinwirkungen von außen. Übermittlung einer Dokumentation, die nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren.

Quellen: Trend Kommerzialisierung der Raumfahrt; Kind et al. 2020; NEA 2019, 44; BGE 2018; Musk 2017; Hora & Winterfeldt 1997, 162.



Alle werden gewinnen

- Die Abfälle sollen umwelt- und sozialverträglich aus Deutschland entfernt werden.

Szenarium: Deutschland ist dauerhaft aus der Nutzung der Kernenergie ausgestiegen. In anderen Ländern wurden Kerntechnologien dagegen konsequent weiterentwickelt und genutzt. Weltweit haben sich verschiedene Typen von Kernreaktoren und nuklearen Antriebstechniken etabliert. Der letzte schwere Reaktorunfall liegt Jahrzehnte zurück und wird auf die damals noch unterentwickelte Governance und Sicherheitstechnik zurückgeführt. International agierende Firmen stehen in einem intensiven Wettbewerb miteinander, um neue Anlagen- und Geschäftsmodelle auf den Markt zu bringen und zu realisieren.

Das deutsche Endlager für hochradioaktive Abfälle ist verschlossen, die Kritik an der Deponierung der gefährlichen Abfälle im tiefen Untergrund jedoch nie verstummt. Nun bietet ein renommierter Konzern an, das Endlager zu überschaubaren Kosten zu räumen und zu sanieren. Die Abfälle sollen ins Ausland verbracht und dort soweit wie möglich zur Energiegewinnung genutzt werden. Das Unternehmen sichert zu, dass die restlichen Abfälle kerntechnisch «verbrannt» oder zur Abklinglagerung in dünn besiedeltes Gebiet verbracht werden. Am Ort der Abklinglagerung hat sich das Unternehmen mit nachhaltigen Entwicklungsprojekten die Zustimmung der nationalen Regierung, internationaler Organisationen und der regionalen Bevölkerung sowie die Duldung durch Umweltorganisationen gesichert. Zudem sieht das Unternehmen vor, die Behältermaterialien und Einbauten, die im verschlossenen Endlager verblieben sind, zu rezyklieren und damit zum Umweltschutz beizutragen.

In den Niederlanden, deren Abfälle aus einem kleineren Kernenergieprogramm stammen als in Deutschland, wurde dieses Vorgehen bereits erfolgreich praktiziert und das Oberflächenlager Hoogradioactief Afval Behandelings- en OpslagGebouw (HABOG) geleert. Die Schweiz hat die Räumung und Sanierung ihres geologischen Tiefenlagers ebenfalls auf politische Agenda gesetzt; die politische Meinungsbildung ist hier aber noch im Gang. Nach intensiven politischen Debatten erteilt die deutsche Regierung den Auftrag, das Endlager zu räumen und zu sanieren. Als Argument für die Räumung und Sanierung wird unter anderem vorgebracht, dass Bergbarkeit und Rückholbarkeit in den 2010er Jahren, als die Weichenstellung für das gegenwärtige Endlager erfolgte, explizit auch vorgesehen worden waren, um ggf. eine bessere Entsorgungslösung zu ermöglichen.

Öffentlichkeitswirksam beginnt das Unternehmen mit dem Rückbau des Endlagers, der zunächst problemlos verläuft. Während der Rückholung der Endlagerbehälter zeichnen sich jedoch technische Schwierigkeiten ab, Verzögerungen und Kostenüberschreitungen häufen sich. Als bekannt wird, dass einzelne Endlagerbehälter beim Versuch der Rückholung beschädigt wurden, kommt es rund um den Endlagerstandort zu Protesten. Das Unternehmen, das die Räumung und Sanierung vornehmen sollte, gerät in wirtschaftliche Schwierigkeiten. Außenpolitisch bauen sich Spannungen zwischen Deutschland und dem Her-

kunftsland des beauftragten Unternehmens auf. Das Endlager ist geöffnet und die Sicherheitsbarrieren sind beeinträchtigt. Die Sicherheitsfunktionen können nicht mehr vollständig gewährleistet werden. Bis eine Lösung für diese Probleme gefunden ist, bestehen erhöhte Risiken für Mensch und Umwelt.

Merkmale: Das Szenarium knüpft an das Ergebnis einer Eurobarometerstudie an, wonach eine große Mehrheit der Deutschen, ebenso wie der Bewohner anderer europäischer Länder, gegenwärtig überzeugt ist, dass keine sichere Entsorgungslösung für hochradioaktive Abfälle existiert. Daraus und aus den immer wieder auftretenden Vorschlägen, die hochradioaktiven Abfälle im Ausland zu entsorgen, entsteht ein politischer Handlungsdruck, die Abfälle möglichst definitiv zu beseitigen oder aus Deutschland zu entfernen. Die gesellschaftlichen Kontroversen zur Nutzung der Kernenergie und zur Entsorgung hochradioaktiver Abfälle wirken in diesem Szenarium auch, nachdem das «letzte Kapitel der Atomenergienutzung» geschrieben wurde, nach. Informationen zum Endlager sind vorhanden. Der Entwicklungsstand der Kerntechnik ist international im Vergleich zur aktuellen Situation fortgeschritten.

Die Plausibilität des Szenariums wird als mittel eingeschätzt. Dass politischer Handlungsdruck zur Räumung des Lagers entstehen kann, erscheint naheliegend. Ob tatsächlich eine Entscheidung zur Räumung gefällt wird, ist angesichts der damit verbundenen Kosten und Risiken aber fraglich.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Vorbereitung von Kriterien und Maßnahmen, die zum Tragen kommen sollen, falls Zweifel an der Sicherheit des Endlagers entstehen und die auch im vorliegenden Fall als Entscheidungsgrundlage genutzt werden könnten. Konsequentes Vorausplanen und Vorbereiten von Rückholung und Bergung, solange das Wissen darum in Deutschland noch vorhanden ist.

Quellen: Treiber politische Kontroversen um die Sicherheit des Endlagers, Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik; Trends Kreislaufwirtschaft, internationale Weiterentwicklung der Kerntechnik; GAO 2015; IRSN 2015; DOE 2010; European Commission 2008, 91.



Blumenkinder

➤ Menschen dringen sorglos zum Endlager vor.

Szenarium: Die gesellschaftliche und technologische Entwicklung im Umfeld des Endlagers hat einen Weg eingeschlagen, der Menschen ein sorgloses und unbeschwertes Leben ermöglicht. Wohlstand ist zur Normalität geworden, eine gute Grundversorgung mit allem Notwendigen sichergestellt. Zwischen Umwelt und Menschheit hat sich ein Gleichgewicht eingespielt, das eine nachhaltige Koexistenz ermöglicht. Um diese nachhaltige Koexistenz aufrecht zu erhalten, reicht es aus, dass Menschen die Erdoberfläche und den oberflächennahen Untergrund nutzen. Global herrscht inzwischen Einigkeit, dass andere bisher von Menschen weitgehend unberührte Räume wie das Weltall oder der tiefe Untergrund ihrer natürlichen Entwicklung überlassen werden sollen. Sie sollen von Menschen nur dann angetastet werden, wenn dies dem Erkenntnisgewinn dient oder existenziell notwendig ist. Wissenschaft und Forschung haben in der Gesellschaft einen hohen Stellenwert erlangt, aber die Beschäftigung mit der als unterentwickelt und düster wahrgenommenen Vergangenheit wurde im Lauf der Jahrzehnte mehr und mehr an den Rand gedrängt. Daher sind sowohl die Informationen über die Existenz des Endlagers verloren gegangen als auch die Kompetenzen zum Umgang mit hochradioaktiven Abfällen.

Eine Gruppe junger Menschen beteiligt sich an einem Forschungsprojekt zum tieferen Untergrund. Geophysikalische Messungen haben gezeigt, dass sich nicht allzu weit entfernt eine Anomalie befindet. Erfahrene Wissenschaftler verweisen darauf, dass diese Anomalie aus Vorsorgegründen zu meiden sei. Zudem gibt es auch Regeln zum Schutz natürlicher und «archäologisch relevanter» Räume. Die jungen Menschen spekulieren darüber, was sich hinter der Anomalie verbergen könnte. Sie beschließen, tiefer in den Untergrund vorzudringen und herauszufinden, was sich hinter der Anomalie verbirgt. Dazu nutzen sie eine Maschine, die sich vertikal und horizontal im Untergrund bewegen kann und zu Forschungszwecken eingesetzt wird. Die Gefahr, wegen der Regelübertretung zur Rechenschaft gezogen zu werden, schätzen sie als gering und tragbar ein.

Obwohl die jungen Menschen das Lager bald nach dem Eindringen wieder verlassen haben, erleiden sie gesundheitliche Schäden, zu deren Ursachen zunächst Unklarheit besteht. Um aufzudecken, was sich tatsächlich ereignet hat, sind umfassende Recherchen und Untersuchungen erforderlich. Die jungen Menschen werden medizinisch behandelt, die Sicherheit des Endlagers wieder hergestellt. Das Ereignis löst jedoch in der Gesellschaft tiefe Irritationen aus und wirft die Frage auf, inwiefern weitere schleichende Gefahren im tiefen Untergrund lauern und wie damit umgegangen werden soll.

Merkmale: Das Szenarium basiert auf einer utopischen Vorstellung von Zukunft und folgt damit der Zukunftserzählung «Fortschritte der Menschheit». Gesellschaft und Technologie haben sich in eine Richtung weiterentwickelt, die aus heutiger Sicht als überwiegend positiv bewertet wird. Im Bestreben, Frieden und Harmonie zu bewahren, werden jedoch Risiken, die aus der Vergangenheit weiter in die Gegenwart hineinwirken, verdrängt. Informationen über das Endlager sind verloren gegangen oder zumindest nicht ohne weiteres verfügbar. Dass Risiken, die aus der Vergangenheit stammen, vergessen und verdrängt werden,

scheint aus heutiger Sicht plausibel. Die Kombination von technischem Fortschritt und Selbstbeschränkung bei der Nutzung neuer Technologien wirkt jedoch utopisch. Die Plausibilität wird daher als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Berücksichtigung von Einwirkungen auf das Endlager, die aus der Tiefe oder horizontal erfolgen bei der Optimierung der Endlagersicherheit. Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellem Vortrieb erkannt werden kann.

Quellen: Treiber Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik, Streben nach neuen Erkenntnissen; Trends Automatisierung und Robotik, Individualisierung, nachhaltige Entwicklung, Umweltschutz; Bailey 2014.



Darwinismus im Untergrund

➤ Das «Neuland» im Untergrund wird unreguliert genutzt.

Szenarium: Das Interesse von Menschen am Untergrund ist stark gewachsen. Im Untergrund werden stoffliche und energetische Ressourcen genutzt und gespeichert, neue Räume für menschliche Aktivitäten, zum Beispiel Transportsysteme, Freizeitanlagen und Datenspeicher, erschlossen, Bio- und Geotope, Lagerstätten von Fossilien sowie oberflächennah auch archäologische Zeugnisse entdeckt, erforscht und geschützt. Neue technologische Entwicklungen, vor allem im Untertagebau, erleichtern die Nutzung des Untergrunds. Die Digitalisierung erlaubt es, den Untergrund differenziert dreidimensional zu kartieren und die wachsenden Datenmengen zu Merkmalen des Untergrunds vielseitig auszuwerten. Erfahrungen aus Pionierprojekten, zum Beispiel beim unterirdischen Gütertransport, werden genutzt, um erfolgreich neue Vorhaben «in Serie gehen zu lassen».

Die Rolle des Staates ist geschwächt. Das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger in staatliche Institutionen ist angesichts wahrgenommener Fehlleistungen und Ineffizienz geschwunden. International tätige privatwirtschaftliche Unternehmen kontrollieren viele Bereiche, die früher staatlich reguliert waren und stellen damit «neuartige Nationen» dar. Um die Nutzungen des Untergrunds hat ein intensiver Wettlauf eingesetzt. Aufgrund fehlender demokratischer Regulierung und staatlicher Durchsetzung der vorhandenen rechtlichen Vorgaben gilt weitgehend «das Recht des Stärkeren».

Der für die Langzeitsicherheit erforderliche Schutzraum um das Endlager wird nicht mehr respektiert. Es kommt zu mechanischen, hygrogeologischen und chemischen Veränderungen im Umfeld des Endlagers, die die Langzeitsicherheit beeinträchtigen. Diese Verände-

rungen können auch subtil sein und zum Beispiel auf Vibrationen aus untertägigen Verkehrssystemen zurückgehen. Zudem rücken die zu schützenden «Menschen und Umwelt» zunehmend näher an das Lager heran.

Merkmale: Das Szenarium kombiniert aktuelle Visionen einer intensiven Nutzung des Untergrunds mit der Vorstellung einer unregulierten von Partikularinteressen getriebenen Eigendynamik der Raumnutzung im Untergrund. Damit weist es in Richtung der Zukunftserzählung «Demokratieverlust». Die Zukunftserzählung «Neuland Untergrund» wird stärker als in anderen Szenarien wie «Riss-System», in denen diese Erzählung ebenfalls mit-schwingt, umgesetzt. Informationen zum Endlager sind verfügbar. Der technologische Entwicklungsstand ist gegenüber der gegenwärtigen Situation fortgeschritten und erleichtert die Erschließung des Untergrunds, auch des tiefen Untergrunds. Angesichts der zahlreichen Treiber, die für eine intensivere Nutzung des Untergrunds sprechen, wird die Plausibilität dieses Szenariums als hoch eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können. Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, Mangel an Rohstoffen und Energie, Überbevölkerung, Migration, Mangel an Raumreserven, Umweltveränderungen, Klimawandel, Verfall staatlicher Ordnung, Entstehung rechtsfreier Räume, wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds; Trends Automatisierung und Robotik, Digitalisierung, Energiewende, Klimaanpassung, Mobilität, Urbanisierung; EGK 2021; TNO 2020; NEA 2019, 41; Kind & Bogenstahl 2017; Parriaux et al. 2010; Hora & Winterfeldt 1997, 162.



Deinococcus habilis

- Die Kontrolle über das Endlager soll zurückgewonnen werden.

Szenarium: Das Endlager ist verschlossen und passiv sicher. Die Gesellschaft, auf deren Gebiet das Endlager liegt, hat entschieden, weiterhin verantwortungsvoll mit dem Endlager umzugehen. Auflagen zum Schutz des Lagers wurden formuliert, deren Einhaltung konsequent kontrolliert wird. Am Standort des Endlagers findet ein Umweltmonitoring statt. Für den Fall, dass sich das Lager nicht wie geplant entwickeln sollte, wurden Regelungen, Konzepte und Einsatzpläne entwickelt. Im nationalen Kompetenzzentrum, das sich mit neuen

Entwicklungen, die weltweit in der Kerntechnologie stattfinden, befasst, werden Informationen, die für die Sicherheit des Endlagers relevant sein könnten, erhoben und ausgewertet.

Dazu zählt auch die Entdeckung von *Deinococcus habilis*, einer neuen Art von Bakterien, in einer ausländischen Kernanlage. Ein Bakterium, das der gleichen Gattung angehört, *Deinococcus radiodurans*, hatte bereits im 20. Jahrhundert einen größeren Bekanntheitsgrad erlangt, weil es unter extremen Lebensbedingungen überdauern kann, zum Beispiel im Weltall oder im Kühlwasserkreislauf von Kernreaktoren. Auch *Deinococcus habilis* ist polyextremophil. Unter den Lebensbedingungen, die in geologischen Tiefenlagern vorherrschen, scheint er sich besonders gut zu vermehren und dabei auch evolutiv verhältnismäßig rasch weiterzuentwickeln. Seine Entdeckung führt zu Kontroversen darüber, inwiefern die Sicherheit des Endlagers durch Mikroorganismen gefährdet ist, deren Existenz bei der Konzeption und Realisierung des Endlagers noch nicht bekannt war oder deren Einflüsse auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagers damals nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

Schon länger wurde diskutiert, einen Teil des Lagers wiederzueröffnen, um die Kontrolle über das Endlager zu verbessern. Als Vorbild wird das schweizerische Pilotlager zitiert, das immer wieder interessante neue Erkenntnisse hervorbringt und das Vertrauen der Bevölkerung in das Endlager gestärkt hat. Die Entdeckung von *Deinococcus habilis* liefert nun den entscheidenden Anstoß dafür, die politische Entscheidung zur Wiedereröffnung des Endlagers zu fällen. Im «Pilotlabor» soll in Zukunft unter Einhaltung hoher Sicherheitsanforderungen weiter daran geforscht werden, wie sich das Lager im Lauf der Zeit entwickelt, um unerwünschte Überraschungen frühzeitig erkennen zu können.

Zwei Jahrzehnte später bringt die Arbeit des Forschungslabors im Endlager keine aufseherregenden Ergebnisse mehr hervor. Das Interesse an Endlagern ist inzwischen auch international erlahmt, die Schweiz hat die Pilotlagerung beendet. Eine wirtschaftliche Rezession zwingt die öffentliche Hand zum Sparen. Daher stellt das Labor seinen Betrieb zunächst vorübergehend ein und der Zugang zum Endlager wird provisorisch geschlossen. In Politik und Medien wird rückblickend scharfe Kritik an der kostspieligen «unnötigen Übung Pilotlabor» laut. Die ursprüngliche politische Absicht, den Betrieb des Labors später wieder aufzunehmen, wird nicht mehr umgesetzt. Die Mahnungen von Spezialistinnen und Spezialiten, es sei unbedingt erforderlich, das Lager wieder ordnungsgemäß zu verschließen, haben kein Gewicht. Die Sicherheitsfunktionen des Endlagers bleiben dauerhaft beeinträchtigt. Das Endlager müsste zumindest teilweise saniert werden, um die ursprünglichen Sicherheitsanforderungen wieder zu erfüllen. Ansonsten sind längerfristig gesundheitliche Schäden bei Menschen und Umweltschäden möglich.

Merkmale: Im Szenarium wird eine wechselhafte politische Entwicklung skizziert, die am ehesten der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart» entspricht. Die Haltung von Politik und Gesellschaft zum Endlager schwankt zwischen starker Gewichtung von Sicherheitsvorsorge und Laissez-faire. Informationen zum Endlager sind vorhanden und werden um neue Erkenntnisse ergänzt. Forschung und Technologie haben sich gegenüber dem aktuellen Stand weiterentwickelt. Die Plausibilität eines derartigen Szenariums wird angesichts oft wechselhafter politischer Entscheidungen als hoch eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Vorbereitung von Kriterien und Maßnahmen, falls Zweifel an der Sicherheit des Endlagers entstehen.

Quellen: Treiber Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik, Streben nach neuen Erkenntnissen; Trend nachhaltige Entwicklung; Wikipedia 2021; EKRA 2000; Hora & Winterfeldt 1997, 157.



Die Maulwurfmaschine

➤ Eine autonome Maschine richtet, von Menschen unbemerkt, Schaden am Endlager an.

Szenarium: Eine Maschine bewegt sich autonom im Untergrund, um einen bestimmten Auftrag zu erfüllen, beispielsweise die genauere Erkundung des Untergrunds. Sie ist äußerst robust und verfügt über eine Energieversorgung und Antriebstechnik, die es ihr erlauben, über lange Zeiträume im Untergrund aktiv zu sein. Die Maschine kann sich vertikal bewegen, ist jedoch überwiegend in horizontaler Richtung unterwegs. Die Vorkehrungen zur Kommunikation mit ihren Auftraggebern sind ausgefallen, oder die entsprechenden Signale werden nicht mehr abgerufen und ausgewertet. Das Material, das die Maulwurfmaschine abbaut, lässt sie im Untergrund hinter sich zurück.

Es besteht die Möglichkeit, dass die Maulwurfmaschine zunächst unbemerkt in ein Endlager eindringt – und zwar nicht nur von der Erdoberfläche her, sondern auch seitlich oder aus der Richtung des Erdinneren. Die Schädigung von Barrieren und Sicherheitsfunktionen, die dadurch verursacht wird, würde von Menschen unbemerkt bleiben, da der Kontakt zur Maulwurfmaschine verloren gegangen ist. Der Weg, den sich die Maulwurfmaschine durch den Untergrund gebahnt hat, bildet eine mögliche bevorzugte Wegsamkeit für Radionuklide, die aus dem Endlager freigesetzt worden sind.

Falls die Maulwurfmaschine dafür konstruiert wurde, größere Vorkommen an Metallen im tieferen Untergrund aufzuspüren, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sie ins Endlager eindringt.

Merkmale: Dieses Szenarium fokussiert auf eine spezielle technische Lösung – die Maschine, die autonom den Untergrund durchfährt. Information zum Endlager spielt nur eine untergeordnete Rolle, es sei denn, es würde ein wirksames Monitoring des Endlagers von der Erdoberfläche aus durchgeführt, mit dem Störungen wie das Eindringen der Maulwurfmaschine erkannt werden. Die Konstruktion und «Freisetzung» einer Maulwurfmaschine setzt im Vergleich zur gegenwärtigen Situation technologische Weiterentwicklungen und ein stärkeres Interesse von Menschen am geologischen Untergrund voraus. Dass die Kontrolle über die Maschine verloren gegangen ist, kann darauf hindeuten, dass Sicherheit in

der Gesellschaft an Stellenwert verloren hat. Es kann sich aber auch um einen seltenen Unfall handeln, der in einer sehr spezifischen Situation zustande kam und unter Tausenden von Maulwurfmaschinen nur eine betrifft. Die Maschine, die ein von Menschen nicht mehr kontrolliertes Eigenleben entwickelt, nimmt Elemente der Zukunftserzählungen «Transhumanismus und neue Lebensformen» und «Niedergang der Menschheit» auf.

Die Maulwurfsmaschine steht stellvertretend für Szenarien, bei denen Menschen die Kontrolle über eine autonome Technik verlieren. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solcher Kontrollverlust zur Schädigung des Endlagers führt, dürfte allerdings gering sein. Daher wird die Plausibilität des Szenariums als mittel eingestuft.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellem Vortrieb erkannt werden kann. Einfaches Lagerkonzept unter Verwendung weit verbreiteter Materialien, um Anreize, gezielt auf das Lager zuzusteuern, gering zu halten. Berücksichtigung von Einwirkungen auf das Endlager, die aus der Tiefe oder horizontal erfolgen, bei der Optimierung der Endlagersicherheit.

Quellen: Treiber Mangel an Rohstoffen und Energie, Streben nach neuen Erkenntnissen; Trend Automatisierung und Robotik; Benford 1999, 40-41.



Drift into failure

➤ Nach und nach lässt die Aufmerksamkeit für die Sicherheit des Endlagers nach.

Szenarium: Der Verschluss des Endlagers liegt schon einige Zeit zurück. Die Überwachung während der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers hat ebenso wie die Umweltüberwachung in den ersten Jahren nach dem Verschluss keine Hinweise darauf ergeben, dass die Sicherheitsbewertung korrigiert werden müsste. Im Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit ist das Endlager nicht mehr präsent. Nur vereinzelt beschäftigen sich Spezialistinnen und Spezialisten, die beispielsweise die Geschichte der Umweltpolitik erforschen, noch mit diesem Thema.

Die technologische Entwicklung erlaubt der Menschheit vielfältige Aktivitäten, die auch den geologischen Untergrund beeinflussen. Gesellschaftliche Entwicklungen setzen Anreize, im Untergrund aktiv zu werden, zum Beispiel zur nachhaltigen Energiegewinnung. Anfänglich wird dabei konsequent auf das Endlager Rücksicht genommen. Strenge Sicherheitsauflagen werden befolgt. Nach und nach werden diese Sicherheitsauflagen aber immer weniger verstanden und ernst genommen. Über einen längeren Zeitraum summieren sich daher menschliche Einflüsse, die die Sicherheitsfunktionen des Endlagers beeinträchtigen, so dass das Lager schließlich seine Funktion, die Abfälle von der Biosphäre abzuschließen, nicht mehr ausreichend erfüllt.

Durch das Austreten von Radionukliden, die in Lebensräume migrieren, kann die Gesundheit von Menschen beeinträchtigt werden und Umweltschäden sind möglich. Diese Schäden treten erst mit zeitlicher Verzögerung auf.

Merkmale: Das Szenarium nimmt die Zukunftserzählung «Neuland Untergrund» auf. Ihm liegen Erkenntnisse aus der Arbeits- und Organisationspsychologie zugrunde, die aufzeigen, wie eine Verkettung scheinbar wenig bedeutsamer Entscheidungen schließlich zu schwerem Versagen führt. Die Information zum Endlager ist nach wie vor vorhanden, wird aber nicht (ausreichend) zur Kenntnis genommen. Die gesellschaftliche Entwicklung setzt Anreize für Aktivitäten, die den Untergrund beeinflussen. Die technologische Entwicklung erleichtert solche Aktivitäten. Kontroversen um die Sicherheit des Endlagers sind gesellschaftlich nicht mehr relevant. Die Sensibilisierung für die mit dem Endlager verbundenen Risiken hat in der Gesellschaft abgenommen. Aus heutiger Sicht erscheint die Plausibilität dieses Szenariums, das Ähnlichkeiten mit dem Szenarium «Darwinismus im Untergrund» aufweist, hoch.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können. Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellem Vortrieb erkannt werden kann.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, Mangel an Rohstoffen und Energie, Streben nach neuen Erkenntnissen, Überbevölkerung, Migration, Mangel an Raumreserven, Umweltveränderungen, Klimawandel, wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds; Dekker 2011.



Einsturz

➤ Unterirdische Hohlräume werden instabil.

Szenarium: Deutschland ist dicht besiedelt. Der untiefe Untergrund wird vielfältig genutzt. Für Nutzungen mit größerem Raumbedarf wird daher in den tieferen Untergrund ausgewichen. Das betrifft zum Beispiel Speicherräume für Wasser und Energieträger. Während sich zur Nutzung des untiefen Untergrunds durch eine Vielzahl von Akteuren differenzierte privatrechtliche Regeln herausgebildet haben, die ständig weiterentwickelt werden, erfolgt die Nutzung des tiefen Untergrunds stärker Gemeinwohl-orientiert.

Manche Speicherräume werden ständig genutzt, andere stehen oft auch über längere Zeit leer. Dazu zählen Speicherräume, die Wetterextreme ausgleichen sollen, indem sie beispielsweise extreme Hochwasser abfangen oder helfen, Hitze- und Dürreperioden mit einem ausreichenden Vorrat an Trinkwasser zu überbrücken.

Aufgrund eines Planungsfehlers wird im Umfeld des Endlagers ein großer Speicherraum instabil und bricht in sich zusammen. Induzierte Seismizität, die Bildung von Einsturztrichtern und neuen Klüften betreffen direkt und indirekt auch die Sicherheit des Endlagers. Abklärungen zu den Auswirkungen auf die Barrieren und Sicherheitsfunktionen des Endlagers sind erforderlich. Sanierungsmaßnahmen müssen ergriffen werden; ansonsten ist der Schutz von Menschen und Umwelt beeinträchtigt.

Merkmale: In Deutschland sind reiche Erfahrungen mit Einsturztrichtern und induzierter Seismizität aufgrund von Bergbauaktivitäten vorhanden, an die sich dieses Szenarium anlehnt. Aktivitäten im Umfeld des Endlagers, die zu Einsturztrichtern, induzierter Seismizität und weiteren potentiellen Bedrohungen für die Sicherheit des Endlagers führen können, setzen voraus, dass der gesellschaftliche Stellenwert der Sicherheit des Endlagers im Vergleich zur Gegenwart abgenommen hat. Das Szenarium ist so konstruiert, dass gegenüber der gegenwärtigen Situation gewisse technologische Weiterentwicklungen zu verzeichnen sind. Informationen über das Endlager sind vorhanden. Aufgrund der Verbindung von technologischem Fortschritt mit nicht-ausreichenden Sicherheitsvorkehrungen folgt es am ehesten der Zukunftserzählungen «Fortschreibung der Gegenwart». Zudem ist die Erzählung «Neuland Untergrund» angesprochen.

Dass im Umfeld des Endlagers ein großer unterirdischer Speicherraum errichtet wird, der kollabieren kann, erscheint aus heutiger Perspektive eher unwahrscheinlich. Die Plausibilität des Szenariums wird daher als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Robustheit der Barrieren, vor allem gegen physikalische Einwirkungen. Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, Mangel an Rohstoffen und Energie, schwere Naturereignisse, Überbevölkerung, Migration, Mangel an Raumreserven, Umweltveränderungen, Klimawandel, wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds. Trends Energiewende, Klimaanpassung; BGT 2021; MDR 2021; NEA 2019, 23 und 41; FAZ 2008.



Fataler Fehler

- Das Endlager wird durch Anwendung einer heute noch unbekannten Technologie beschädigt.

Szenarium: Seit dem Verschluss des Endlagers ist die technologische Entwicklung weit fortgeschritten. Die Menschheit arbeitet mit physikalischen Phänomenen, die gegenwärtig noch nicht oder kaum bekannt sind, und setzt physikalische Mittel, zum Beispiel spezifische

Teilchenstrahlungen, ein, die sich heute noch nicht nutzen lassen. Die Entwicklung dieser Technologien wurde durch die Expansion ins Weltall gefördert. So werden mittlerweile zum Beispiel Asteroiden und benachbarte Planeten zur Gewinnung von Rohstoffen genutzt. Manche der neuen Technologien werden auch angewendet, um die Erde bis in den Erdkern hinein zu charakterisieren und zu kartieren.

Bei der Erforschung oder Erprobung einer neuen Technologie ereignet sich ein Unfall, bei dem das Endlager beschädigt wird. Das Endlager muss saniert werden. Eventuell wird die Gesundheit von Menschen beeinträchtigt und es treten Umweltschäden auf. Je nach Rahmenbedingungen könnte der Unfall auch zum Anlass genommen werden, um die radioaktiven Abfälle mit neuen Entsorgungstechniken zu behandeln und unschädlicher zu machen oder die Abfälle an einen «sicheren Ort» im Weltall zu verbringen.

Merkmale: Dieses spekulative Szenarium greift Diskussion auf, die im Zusammenhang mit Versuchen an Großforschungseinrichtung wie dem CERN bei Genf geführt wurden. Die Forschung zum Aufbau der Materie und zu Wechselwirkungen zwischen Elementarteilchen, so wird befürchtet, könnte zu bisher unbekannten physikalischen Effekten führen, die tiefgreifende und zerstörerische Auswirkungen auf der Erde entfalten. Ob Informationen zum Endlager noch verfügbar sind, ist für dieses Szenarium kaum relevant. Das Szenarium geht davon aus, dass sich Forschung und Technologie im Vergleich zur gegenwärtigen Situation erheblich weiterentwickelt haben, der Schutz vor schweren Unfällen allerdings mit dieser Entwicklung nicht schritthalten konnte. Damit ist eine pessimistische Variante der Zukunftserzählung «Fortschritte der Menschheit» angesprochen. Aufgrund des spekulativen Charakters wird die Plausibilität des Szenariums als gering eingestuft.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen.

Quellen: Treiber Streben nach neuen Erkenntnissen; ITA AIT 2019 – 032; Zukunftsinstitut 2012.



Fehlalarm

➤ Zweifel an der Sicherheit des Endlagers kommen auf.

Szenarium: Der Verschluss des Endlagers ist bereits vor einiger Zeit erfolgt. Die Dokumentation zum Endlager ist weiterhin verfügbar und wurde laufend weitergeführt. So liegen neben den Informationen, die beim Verschluss des Endlagers zur dauerhaften Archivierung weitergegeben wurden, auch jüngere Informationen, zum Beispiel zum Umweltmonitoring

um das Endlager und zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die für die Sicherheit relevant werden könnten, vor.

Im Lauf der Zeit verändern sich die Werte eines Umweltparameters, der periodisch gemessen wird. Dieses Phänomen ist nach Einschätzung der Umweltbehörde unbedenklich, da keine Grenzwertüberschreitung vorliegt oder in absehbarer Zukunft droht, und bleibt daher zunächst unbeachtet. In einer Diskussion am Rand einer Fachtagung bringt ein Nachwuchswissenschaftler jedoch eine mögliche Verbindung mit dem Endlager ins Spiel. Seine argumentativ gut gestützte Vermutung findet zunehmend Resonanz in der Öffentlichkeit, so dass die zuständige Behörde schließlich entscheidet, das Lager und seine nähere Umgebung invasiv untersuchen zu lassen. Dafür nimmt sie bewusst auch eine Schwächung der Barrieren und damit eine Verminderung der Langzeitsicherheit in Kauf. Dieser Entscheidung liegt die Haltung zugrunde, dass der Schutz von Menschen, deren Sicherheit jetzt auf dem Spiel steht, Vorrang vor dem Schutz hypothetischer künftiger Generationen hat.

Die Untersuchungen zeigen, dass das Endlager die Sicherheitsanforderungen wie geplant erfüllt, haben die Barrieren des Endlagers jedoch dauerhaft geschwächt. Durch das Ausreten von Radionukliden, die in Lebensräume migrieren, kann die Gesundheit von Menschen beeinträchtigt werden und Umweltschäden sind möglich. Potentielle Schäden treten erst mit zeitlicher Verzögerung auf.

Merkmale: Das Szenarium folgt der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart» und weist Ähnlichkeiten mit dem Szenarium «Deinococcus habilis» auf. Auch hier folgt auf eine Phase hoher Sensibilisierung für die Risiken des Endlagers eine Phase nachlassender Aufmerksamkeit. Die Schwankungsbreite ist jedoch weniger ausgeprägt als bei «Deinococcus habilis». Angesichts vermuteter Gefahren in der Gegenwart rückt der Schutz künftiger Generationen schließlich – anders als in den Zeiten, in denen das Endlager konzipiert wurde – stärker in den Hintergrund. Informationen zum Endlager sind weiterhin vorhanden und werden bei den Untersuchungen genutzt. Technologisch sind im Vergleich zur gegenwärtigen Situation keine Weiterentwicklungen erforderlich. Die Plausibilität des Szenariums wird als hoch eingeschätzt. Der Treiber «Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik» dürfte für das Endlager auch nach dessen Verschluss noch bedeutsam bleiben.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Vorbereitung von Kriterien und Maßnahmen, falls Zweifel an der Sicherheit des Endlagers entstehen.

Quellen: Treiber Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik, Streben nach neuen Erkenntnissen; Trend nachhaltige Entwicklung; Überlegungen zum Umgang mit falschen oder unklaren Monitoringergebnissen im TAP TRUST bei TRANSENS.



Fokus Tiefe

- Menschliche Aktivitäten wirken aus der Tiefe auf das Endlager ein.

Szenarium: Seit dem Verschluss des Endlagers ist die politische und wirtschaftliche Entwicklung in Europa stabil verlaufen. Der größte Teil der Bevölkerung lebt in Wohlstand. Der Schutz der Umwelt hat in der Gesellschaft ebenso wie die Gestaltung und Pflege einer ansprechenden Umgebung einen hohen Stellenwert erlangt. Die nachhaltige Bewirtschaftung von Ressourcen und eine abnehmende Bevölkerungsdichte führten dazu, dass nur der oberflächennahe Untergrund vermehrt genutzt wird – zum Beispiel für Gütertransportsysteme und zur Lagerhaltung. Anlagen zur Versorgung mit erneuerbaren Energien wie Windräder und Photovoltaikanlagen wurden technisch weiterentwickelt. Trotzdem werden sie als zunehmend störend empfunden, unter anderem aufgrund von Konflikten mit dem Umwelt- und Landschaftsschutz.

Das Interesse verlagert sich daher mehr und mehr auf die Energienutzung im tiefen Untergrund. Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Tiefbohrungen haben sich, unter anderem dank internationaler Großprojekte, stark verbessert. Ultra-tiefe Geothermie ist in einigen europäischen Ländern bereits stark verbreitet. Die deutsche Bundesregierung hat ein Programm in die Wege geleitet, um die technische Entwicklung der ultra-tiefen Geothermie zu fördern und ihre Nutzung voranzutreiben.

Ultra-tiefe Wärmevorkommen sollen auch im weiteren Umfeld des Endlagers erschlossen werden. Bei einem dieser Projekte treten weiträumige Nebenwirkungen in der Tiefe auf, die auf Dauer die Sicherheitsbarrieren des Endlagers schwächen, zum Beispiel Wechselwirkungen von schwacher induzierter Seismizität und chemischen Veränderungen. Diese Veränderungen sind so subtil, dass sie bei den vorlaufenden Risikoanalysen zur ultra-tiefen Geothermie nicht erkannt wurden und verlaufen so langsam, dass sie auch bei bereits realisierten anderen Projekten zur Nutzung ultratiefer Geothermie noch nicht festgestellt wurden. Falls die Schäden erkannt werden, muss das Endlager saniert werden. Falls nicht gehandelt wird, können auf Dauer die Gesundheit von Menschen und die Umwelt beeinträchtigt werden.

Merkmale: Wichtiges Handlungsmotiv in diesem Szenarium ist der Umwelt- und Landschaftsschutz. Die Entscheidung, Energie stärker aus dem ultra-tiefen Untergrund zu beziehen, wird also nicht aus einer Krisensituation heraus gefällt. Informationen zum Endlager sind vorhanden und werden genutzt. Gegenüber der gegenwärtigen Situation sind technologische Weiterentwicklungen zu verzeichnen. Die verdeckten Nebenwirkungen der Geothermienutzung hätten ggf. vermieden werden können, wenn die Sensibilisierung für vom Endlager ausgehende Risiken größer gewesen wäre. Das Szenarium folgt den Zukunftserzählungen «Fortschritte der Menschheit» und «Neuland Untergrund», wobei in beiden Fällen negative Auswirkungen auf die Sicherheit des Endlagers auftreten.

Neben dem Treiber «Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik», der in diesem Szenarium im Vordergrund steht, können ähnliche Szenarien auch auf den Treiber «Mangel

an Rohstoffen und Energie» zurückzuführen sein. Die Plausibilität wird als mittel eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Wahl von Barrieren, die gegenüber einem breiten Spektrum von physikalischen, chemischen und biologischen Einwirkungen robust sind. Auch Einwirkungen auf das Endlager in Betracht ziehen, die aus der Tiefe erfolgen.

Quellen: Treiber Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik; Trends Energiewende, nachhaltige Entwicklung, Umweltschutz; BGT 2020; Richter 2020; TNO 2020; NEA 2019, 22; bmb+f 1996.



Gedächtnisverfälschung

➤ Ein Saboteur hinterlässt Spuren.

Szenarium: Das Internet hat sich weiter zu einem global verfügbaren, offenen Wissensspeicher entwickelt. Teil dieses weltweiten Informationsnetzwerks ist ein europäisches Geodatenverbundsystem, dem sich auch Deutschland angeschlossen hat. Im Geodatenverbundsystem werden Informationen über die Beschaffenheit und Nutzung des Untergrunds gesammelt, ausgewertet und in dreidimensionale Darstellungen übersetzt. Insbesondere der oberflächennahe Untergrund ist dort detailliert abgebildet.

Seit dem Verschluss des Endlagers ist einige Zeit vergangen, in der das Interesse am Lager zunehmend geschwunden ist und andere Themen in den Vordergrund gerückt sind. Aktuell stellen sich drängende Fragen zur Rohstoffversorgung. Vor dem Hintergrund des weltweit wachsenden Wohlstands und neuer technologischer Entwicklungen besteht ein hoher Bedarf an metallischen Rohstoffen, der auch mit Kreislaufwirtschaft und dem Ausbeuten wenig ergiebiger natürlicher Vorkommen nicht gedeckt werden kann. Die weitgehende Erschöpfung natürlicher Lagerstätten, wirtschafts- und sicherheitspolitische Erwägungen fördern in Deutschland das Urban Mining. Menschliche Siedlungen, vor allem Städte, und menschliche Relikte werden zunehmend als Minen für Rohstoffe verstanden, urbane Prospektion betrieben, Verzeichnisse der entsprechenden Rohstoffe angelegt.

Im Geodatenverbundsystem sind die Informationen zum Inventar des Endlagers nicht korrekt erfasst. Die fehlerhaften Informationen gehen auf einen unzufriedenen Sachbearbeiter zurück, der die Angaben zum Radionuklidinventar wissentlich verfälschte, ohne dass diese Manipulation je aufgedeckt worden wäre. Auf der Grundlage der nicht-korrekten Informationen im Geodatenverbundsystem setzt ein Unternehmen dazu an, die vermeintlich unbedenklichen Teile des Endlagers als Quelle für metallische Rohstoffe auszubeuten.

Direkte Schäden an Menschen und Umwelt sind möglich und betreffen vor allem diejenigen, die direkt mit dem Explorieren und Öffnen des Endlagers beschäftigt sind. Die Barrieren und Sicherheitsfunktionen des Endlagers werden beeinträchtigt, was eine aufwändige Sanierung erforderlich macht. Falls keine Sanierung erfolgt, sind längerfristige gesundheitliche Folgen bei Menschen und Umweltschäden möglich.

Merkmale: In diesem Szenarium verbindet sich der Treiber «Mangel an Rohstoffen und Energie» mit Risiken der Digitalisierung. Die Abgrenzung zwischen beabsichtigtem und nicht-beabsichtigtem Eindringen («advertent and inadvertent human intrusion»), die in internationalen Regelwerken eine Rolle für das menschliche Eindringen spielt, ist nicht eindeutig. Informationen über das Endlager und Kompetenzen in der Kerntechnik sind verloren gegangen. Der technologische Entwicklungsstand ist gegenüber der gegenwärtigen Situation fortgeschritten. Der Stellenwert, den die Sicherheit des Endlagers bei der Bevölkerung einnimmt, hat im Vergleich zur Gegenwart abgenommen. Das Szenarium lässt sich am ehesten der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart» zuordnen.

Die spezifische Kombination von Datenverfälschung und Interesse an einer Nutzung des Lagerinventars wird als eher unwahrscheinlich und die Plausibilität des Szenariums daher als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Diversität und Redundanz der Informationsvermittlung zum Endlager. Einfaches Lagerkonzept unter Verwendung weit verbreiteter Materialien. Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellern Vortrieb erkannt werden kann.

Quellen: Treiber Mangel an Rohstoffen und Energie, wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds; Trend Digitalisierung; BABS 2020; ITA AIT 2019 – 40; ITA AIT 2019 – 53.



Gold Rush

- Bei der Ausbeutung einer neuen Ressource wird das Endlager durchfahren und nur unzureichend gesichert.

Szenarium: Aufgrund neuer Technologieentwicklungen ist eine stoffliche Ressource für Menschen wesentlich geworden, die zum Zeitpunkt der Stilllegung des Endlagers noch in ausreichenden Mengen verfügbar war bzw. wenig Aufmerksamkeit erfuhr oder sogar unbekannt war. Diese Ressource lässt sich vor allem im oberen Erdmantel finden, ab ca. 700 m unter dem Meeresspiegel. Ein bedeutendes Vorkommen der Ressource wurde unter dem Endlager lokalisiert.

Informationen über das Endlager wurden im Lauf der Zeit als immer weniger wichtig betrachtet. In Archiven wären sie noch auffindbar, sind aber den Menschen, die die Ausbeutung der Ressource vorantreiben, nicht mehr bekannt. Deshalb durchqueren diese Menschen beim Versuch, das Vorkommen auszubeuten, das Endlager maschinell. Die Anomalie

wird von ihnen bemerkt und korrekt als Entsorgungsanlage für Gefahrstoffe aus früheren Epochen eingeordnet. Das Bestreben, das Rohstoffvorkommen auszubeuten, ist jedoch so groß, dass auf das Durchqueren des Endlagers nur bedingt Aufmerksamkeit verwendet wird. Die Durchquerungszone wird abgedichtet und stabilisiert, das geförderte Material als Sonderabfall verpackt und an einem anderen Ort deponiert. Weitere Maßnahmen werden nicht ergriffen.

Mit der Durchquerung des Endlagers werden Barrieren und Sicherheitsfunktionen beeinträchtigt. Die Folgen dieser Schädigung zeigen sich möglicherweise erst stark verzögert an der Erdoberfläche.

Merkmale: Rohstoffverknappung liegt diesem, wie auch einigen anderen Szenarien im Ideenfeld, zugrunde. Dazu treten wirtschaftliche Interessen, ggf. Kompetenzverlust im Bereich der nuklearen Entsorgung und ein verminderter gesellschaftlicher Stellenwert der Endlager-Sicherheit. Information zum Endlager sind vorhanden bzw. werden im Szenarium neu ermittelt, aber nur bedingt genutzt. Gegenüber der gegenwärtigen Situation sind gewisse technologische Weiterentwicklungen zu verzeichnen.

Die Abgrenzung zwischen beabsichtigtem und unbeabsichtigtem Eindringen ist bei diesem Szenarium, wie bei anderen Szenarien auch, nicht eindeutig. Die Verursacher schädigen nicht sich selbst, sondern hinterlassen einen Schaden, der voraussichtlich künftige Generationen betrifft. Das Szenarium enthält Elemente der Zukunftserzählungen «Fortschreibung der Gegenwart» und «Neuland Untergrund». Noch ist nicht bekannt, welche Ressource für Menschen der Zukunft relevant werden könnte. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Vorkommen dieser Ressourcen unter dem Endlager befindet, dürfte gering sein. Daher auch wird die Plausibilität dieses Szenariums als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können. Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellm Vortrieb erkannt werden kann.

Quellen: Treiber Mangel an Rohstoffen und Energie, wirtschaftliche Interessen am Untergrund.



Hybrider Angriff

➤ Hat das Endlager versagt?

Szenarium: Das Endlager ist verschlossen; seine Existenz aber in der Gesellschaft weiterhin präsent. Am Standort des Endlagers befindet sich nun ein Naturpark, der – neben

anderen Kompensationen – die regionale Bevölkerung für die Belastungen durch das Lager entschädigen soll.

Die bestehende sicherheitspolitische Ordnung, in die Deutschland eingebunden ist, wird weltweit von den meisten Ländern akzeptiert und gestützt. Einige Staaten unterlaufen jedoch Verträge und Konventionen. Von ihnen gehen immer wieder Aktionen aus, die Stärke signalisieren und aufzeigen sollen, dass das Verhalten von Kritikern nicht geduldet wird. Dazu zählen auch großangelegte Aktionen, zum Beispiel staatlich gestützte Cyberangriffe. Da die Zahl solcher Angriffe auf politische Institutionen und die Wirtschaft in den letzten Jahren zugenommen hat, haben sich die Spannungen zwischen Deutschland und einem autoritär geführten Land verstärkt. Deutschland gehört zu den Initianten eines internationalen Embargos, das der aufstrebenden Wirtschaft des anderen Staates erheblichen Schaden zufügt.

Der autoritär geführte Staat schlägt daraufhin mit verdeckten Angriffen zurück, die die deutsche Wirtschaft schädigen und die staatliche Ordnung in Deutschland destabilisieren sollen. Elemente dieser hybriden Kriegsführung sind Desinformation und die Verwendung vielfältiger, teils unkonventioneller Kampfmittel. Die Angreifer lassen sich nicht identifizieren und verüben Anschläge, die weitgehend unvorhersehbar sind. Während die Aufmerksamkeit von Politik, Medien und breiter Öffentlichkeit auf einige spektakuläre Cyberangriffe fokussiert ist, die kritische Infrastrukturen betreffen, werden im Naturpark über dem Endlager Radionuklide gemessen, die mit einer Freisetzung aus dem Endlager in Verbindung gebracht werden können, zum Beispiel ¹²⁹Iod-Verbindungen. Radionuklide finden sich auch in den Gärten benachbarter Häuser, an einem Bachlauf und in besonders hoher Konzentration auf einem Kinderspielplatz am Rand des Naturparks.

Trotz intensiver Kommunikation von Politik und Behörden, die zur Beruhigung der Bevölkerung führen sollen, breitet sich in der Region Verunsicherung aus. Deren Auswirkungen lassen sich schließlich nicht mehr eindämmen: Menschen evakuieren ihre Familien und sich selbst aus der Umgebung des Endlagers. Politiker äußern sich zu politischem und institutionellem Versagen in der Vergangenheit. Forschende geben ihre Meinung zu Mängeln des Endlagerkonzepts ab. Aufwändige Abklärungen werden gestartet, ggf. auch mittels Untersuchungen im Untergrund. Bis aufgedeckt und überzeugend nachgewiesen wird, dass ein hybrider Angriff stattgefunden hat, der Verunsicherung auslösen sollte, vergehen Wochen. Die entstehenden Schäden sind vor allem psychosozialer Art und nur indirekt auf das Endlager zurückzuführen.

Merkmale: In diesem Szenarium nutzt der Angreifer die weiterhin bestehende hohe Sensibilisierung für die Risiken des Endlagers sowie ggf. auch einen Kompetenzverlust im Bereich der nuklearen Entsorgung gezielt aus. Die gesellschaftliche Situation ist innenpolitisch weitgehend stabil, außenpolitisch bestehen Spannungen. Information zum Endlager ist noch vorhanden, gesellschaftlich präsent und wird genutzt. Die technologische Entwicklung entspricht dem aktuellen Stand oder ist weiter fortgeschritten. Das Szenarium greift die Zukunftserzählung «Krieg und Konflikt» auf. Vor dem Hintergrund der gegenwärtigen sicherheitspolitischen Situation und des zunehmenden Einsatzes hybrider Kriegsführung wird die Plausibilität dieses Szenariums als mittel eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Vorbereitung von Kriterien und Maßnahmen, falls Zweifel an der Sicherheit des Endlagers entstehen. Dauerhafter Kompetenzerhalt zur nuklearen Entsorgung.

Quellen: Treiber schwerer gesellschaftlicher Konflikt (Krieg). Bundesregierung 2016; Allied Command Transformation 2016; TFS 2013; Nagra 2002.



Infiltration

- Das Lager wird allmählich von Mikroorganismen infiltriert.

Szenarium: Geomikrobiologie hat – dank neuer Forschungsergebnisse, Fortschritten in der Biotechnologie (aus heutiger Sicht vor allem in der Gentechnik und der Synthetischen Biologie) und zunehmender Anwendungserfolge – einen hohen Stellenwert in der Umwelt-, Berg- und Energietechnik sowie bei der Produktion von Nahrungsmitteln, Pharmaka etc. erlangt. Im geologischen Untergrund werden Bakterien, Archaea und weitere Mikroorganismen gezielt eingesetzt, unter anderem, um Altlasten zu sanieren, den Abbau von Rohstoffen zu erleichtern und lithotroph Biomasse zu gewinnen.

Aufgrund der generell zunehmenden menschlichen Aktivitäten im geologischen Untergrund haben sich unbemerkt kleine Wegsamkeiten gebildet und untereinander vernetzt, die es Mikroorganismen nach und nach erlauben, in das Endlager vorzudringen. Die Wärmeentwicklung der hochradioaktiven Abfälle führt dazu, dass sich im näheren Umfeld der Abfälle zunächst thermophile Mikroorganismen ausbreiten. Auf dieser Grundlage entwickelt sich allmählich im Endlager ein neuer Lebensraum. Das Biotop wird besiedelt von «Nutzmikroorganismen», die ins Lager eingewandert sind, Nutzmikroorganismen, die sich vor allem durch Mutationen und horizontalen Gentransfer weiter verändert haben, natürlich vorkommenden Mikroorganismen, die in dem veränderten Umfeld neue Entwicklungsmöglichkeiten vorfinden und natürlich vorkommenden Mikroorganismen, die durch Mechanismen wie horizontalen Gentransfer Eigenschaften der Nutzmikroorganismen angenommen haben. In diesem Lebensraum gedeihen aufgrund von Selektionsmechanismen zunehmend auch Mikroorganismen, die ionisierende Strahlung tolerieren oder radiotroph geworden sind.

Dadurch wird das ursprüngliche Sicherheitskonzept des Endlagers lange unbemerkt untergraben. Denkbar ist, dass Mikroorganismen die Austragung von Radionukliden aus dem Endlager beschleunigen und damit nach längerer Zeit dazu führen, dass die Gesundheit von Menschen beeinträchtigt und die Umwelt geschädigt wird. Aufgrund der Vielfalt von

Lebensformen und der Komplexität von Lebensgemeinschaften ist der Zustand des Abfallinventars, der Barrieren und des geologischen Umfelds des Endlagers schwer prognostizierbar. Eine Sanierung würde sich aus heutiger Sicht sehr aufwändig gestalten.

Merkmale: Das Szenarium ist den Zukunftserzählungen «Fortschritte der Menschheit» und «Neuland Untergrund» zuzuordnen. Im Zentrum des Szenariums stehen Entwicklungen der Biotechnologie, die im Interesse einer nachhaltigen Entwicklung eingesetzt werden können. Information zum Endlager spielt bei diesem Szenarium nur eine untergeordnete Rolle. Gegenüber der gegenwärtigen Situation sind technologische Weiterentwicklungen zu verzeichnen. Vom Beginn der Entwicklung bis zur Ausbildung von Lebensgemeinschaften im Endlager und dem Auftreten möglicher Schäden für Menschen und Umwelt wird dieses Szenarium voraussichtlich einen sehr langen Zeitraum beanspruchen. Die Plausibilität eines Szenariums, bei dem Mikroorganismen das Lager besiedeln und seine Sicherheit beeinträchtigen, nachdem sich aufgrund menschlicher Aktivitäten Wegsamkeiten ins Lager ausgebildet haben, wird als mittel eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können, speziell Optimierung von Barriereneigenschaften im Hinblick auf deren Widerstandsfähigkeit gegen mikrobielle Besiedlung, mikrobiellen Abbau und weitere schädigende Einflüsse von Mikroorganismen.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, Mangel an Rohstoffen und Energie, wirtschaftliche Interessen an der Nutzung des Untergrunds. Trends Konvergenz von Biologie und Technik, nachhaltige Entwicklung; Ebeling 2021; Fischer 2018.



Menschheit 2.0

- Die Umgebung des Endlagers ist von menschlichen und nach-menschlichen Lebensformen besiedelt.

Szenarium: Die Menschheit setzt ihre Produkte und Entwicklungen ein, um sich selbst zu verändern. Genome Editing wird genutzt, um die genetische Konstitution zu verbessern, Synthetische Biologie, um den menschlichen Organismus um neue funktionale Einheiten zu ergänzen. Die Konvergenz von Biologie und Technologie führt dazu, dass Schnittstellen zwischen menschlichem Körper, Computern und Kommunikationsnetzwerken allgegenwärtig werden. Menschen erwerben damit zusätzliche Fähigkeiten, zum Beispiel die Wahrnehmung eines erweiterten Spektrums an elektromagnetischer Strahlung. Körperliche Beschränkungen, denen Menschen zuvor unterlagen, lösen sich auf.

Auf diese Weise haben sich einige der künftigen Menschen in die Lage versetzt, ionisierende Strahlung mit den Sinnen wahrzunehmen. Ihre radiologische Empfindlichkeit hat im Vergleich zu derjenigen der heutigen Menschen stark abgenommen. Treten trotzdem Schäden aufgrund ionisierender Strahlung auf, erlaubt es der medizinische Fortschritt, diese Schäden wirksam zu behandeln. Krebserkrankungen gehören für sie der Vergangenheit an.

In einer liberalen Gesellschaft, die Individualismus hochschätzt, macht ein Teil der Menschheit von den neuen technologischen Möglichkeiten Gebrauch. Ein anderer Teil, hat sich entschieden, die ursprüngliche «natürliche» menschliche Identität beizubehalten und zu schützen. Im Umfeld des Endlagerstandorts leben menschliche und nachmenschliche Lebensformen zusammen. Aufgrund unterschiedlicher Werthaltungen handelt es sich dabei jedoch nur um eine Zweckgemeinschaft, in der immer wieder Konflikte ausbrechen. Für die «Transhumanen» ist das Endlager ein interessantes Experimentierfeld. Die «natürlichen Menschen» bestehen dagegen darauf, alle seit den 2020er Jahren überlieferten Sicherheitsanforderungen einzuhalten und die Sicherheitsbarrieren des Lagers keinesfalls zu stören.

In einer Konfliktsituation manipulieren «Transhumane» das Lager, um «natürliche Menschen» zu provozieren, ggf. auch direkt zu schädigen und aus dem Umfeld des Endlagerstandorts zu vertreiben.

Merkmale: Das Szenarium richtet sich vor allem an der Zukunftserzählung «Transhumanismus und neue Lebensformen» aus. Informationen zum Endlager sind verfügbar. Der technologische Entwicklungsstand ist deutlich weiter fortgeschritten als heute. Die Konflikte, die sich bereits gegenwärtig zwischen Vertreterinnen und Vertretern unterschiedlicher Werthaltungen in Bezug auf Veränderungen der natürlichen Konstitution von Menschen abzeichnen, haben sich verschärft. Kontroversen um die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle aus der Vergangenheit wirken bei der gesellschaftlichen Wahrnehmung des Endlagers nach.

Da das Szenarium eine spezifische Kombination von technologischen und gesellschaftlichen Entwicklungen voraussetzt, wird seine Plausibilität als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Möglichst einfaches Lagerkonzept unter Verwendung weit verbreiteter Materialien, um den Anreiz zum Eindringen gering zu halten. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, politische Kontroversen um die Sicherheit des Endlagers, schwere gesellschaftliche Konflikte. Trends Individualisierung, Konvergenz von Biologie und Technik; ITA AIT 2019 – 020; Kehl & Coenen 2016.



Ökokollaps

➤ In einer angespannten Lage richten sich Wut und Frustration gegen das Endlager.

Szenarium: Der Menschheit ist es nicht gelungen, den Klimawandel zu begrenzen. Zusätzlich tragen Veränderungen der solaren Aktivität zur Erwärmung der Erdatmosphäre bei. Cliff edge-Effekte führen dazu, dass viele Ökosysteme kollabieren. Weite Teile der Erdoberfläche sind für Menschen unbewohnbar geworden. Um ihr Überleben zu sichern, hat die Menschheit die Erdoberfläche und den geologischen Untergrund massiv umgestaltet. Landwirtschaft wird nun in unterirdischen Anlagen mit künstlicher Beleuchtung betrieben. Oberflächengewässer wurden in Hohlräume im geologischen Untergrund abgeleitet. Die Grenzen zwischen «über Tage» und «unter Tage» haben ihre Bedeutung verloren. Die Menschheit ist im Begriff, in der Erdkruste neue Lebensräume und Ökosysteme zu konstruieren. Das Bewusstsein dafür, wie kostbar die schmale Zwischenschicht zwischen der überwärmten Erdoberfläche und dem warmen Erdinneren ist, ist sehr ausgeprägt. Der Schutz dieses Lebensraums hat weltweit politisch oberste Priorität.

Die Notwendigkeit, nahezu alle Ressourcen für das Überleben der Menschheit unter anspruchsvollen Rahmenbedingungen einzusetzen, lässt viele Menschen frustriert, angsterfüllt, verzweifelt und wütend zurück. Die Bewältigung des Ökokollaps erlegt Menschen ständige Zwänge auf. Für Ausgleichsmöglichkeiten, etwa den Wechsel der Jahreszeiten zu erleben oder sich bei schönem Wetter im Freien zu bewegen, wie sie früher bestanden, fehlt ein adäquater Ersatz. In dieser Situation richtet sich die Wut einer radikalen Minderheit, die keine Rücksicht auf die (langfristigen) Risiken nimmt, auf das Endlager, das als Mahnmal für Verfehlungen in der Vergangenheit betrachtet wird. Trotz staatlicher Schutzmaßnahmen kommt es zur Beschädigung von Sicherheitsbarrieren. Das wirkt umso bedrohlicher, als menschliche Lebensräume nun bis an die Grenzen der wesentlichen Barrieren vorgerückt sind. In einer ohnehin angespannten Situation bindet das Endlager also zusätzlich Ressourcen für die Bewachung und die Reparatur von Schäden. Der Schutz von Menschen und der bereits stark vorgeschädigten Umwelt ist beeinträchtigt.

Merkmale: Dieses dystopische Szenarium könnte auch durch eine andere Naturkatastrophe, etwa einen sehr schweren Vulkanausbruch oder den Absturz eines größeren Meteoriten, ausgelöst werden. Inhaltlich lehnt es sich an die Zukunftserzählungen «Niedergang der Menschheit» und «Verseuchte Welt» an. Informationen zum Endlager sind weiterhin vorhanden. Technologische Weiterentwicklungen sind möglich, für das Szenarium aber nicht entscheidend. Gesellschaftlich besteht eine ausgeprägte Krisensituation, die das Überleben der Menschheit in Frage stellt und Konflikte zwischen gesellschaftlichen Gruppen begünstigt.

Der Angriff auf das Endlager ist in diesem Szenarium auf Frustration zurückzuführen. Denkbar wären auch andere, zum Beispiel religiöse Motive. Die Verbindung mit einer notgedrungenen Besiedlung des Untergrunds ist angesichts des Klimawandels oder vor dem Hintergrund schwerer Naturkatastrophen vorstellbar. Insgesamt führt die erforderliche Verkettung verschiedener Voraussetzungen aber dazu, dass die Plausibilität des Szenariums als gering eingeschätzt wird.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Narrative, Framing und Dokumentationen, die den Umweltschutzcharakter des Endlagers betonen. Faire Verfahren und Partizipation, zum Beispiel bei der Standortauswahl oder der Gestaltung der Oberflächenanlagen, die dazu beitragen, dass das Endlager im Rückblick positiv konnotiert wird. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können.

Quellen: Treiber schweres Naturereignis, Klimawandel, Verfall staatlicher Ordnung und Entstehung rechtsfreier Räume; Informationen zu Klimawandel, solaren Einflüssen auf das Klima; Erfahrungen aus der SARS-CoV-2-Pandemie.



Organisierter Gewaltkonflikt

- Das Endlager wird im Krieg beschädigt.

Szenarium: Deutschland ist in einen Krieg mit anderen Nationen oder mächtigen Organisationen verwickelt, der weitgehend mit konventionellen Mitteln geführt wird. Der Standort des Endlagers ist unter Kontrolle der gegnerischen Partei geraten. Die gegnerische Partei strebt an, den Krieg möglichst rasch zu beenden und für sich zu entscheiden. Sie entschließt sich daher, den Widerstand in Deutschland mit einigen Angriffen zu brechen, die zu Demoralisierung in der Bevölkerung führen und anhaltende volkswirtschaftliche Schäden nach sich ziehen.

Einer dieser Angriffe erfolgt am Standort des Endlagers. Dort wird ein starker Sprengkörper unterirdisch zur Explosion gebracht. Der Sprengkörper selbst führt nicht zu radiologischer Kontamination, beschädigt aber die Sicherheitsbarrieren des Endlagers. Damit ist klar, dass Deutschland in der Folge erhebliche Anstrengungen unternehmen muss, um die Sicherheit des Endlagers wiederherzustellen. Der Angriff ist verbunden mit der Drohung, in einem nächsten Schritt Kernwaffen einzusetzen.

Als Variante dieses Szenariums ist auch denkbar, dass der Angreifer das Endlager mit Hilfe von Robotern zerstört und dabei auf ein möglichst hohes Schadenausmaß abzielt.

Unabhängig davon, wie der Krieg weiter verläuft, muss das Endlager unter erschwerten Bedingungen saniert, ggf. auch geräumt und an einem anderen Ort neu errichtet werden. Neben Schäden an Menschen und Umwelt ist auch mit erheblichen volkswirtschaftlichen Folgen zu rechnen.

Merkmale: Das Szenarium folgt der Zukunftserzählung «Krieg und Konflikt». Krieg in seinen unterschiedlichen Formen lässt sich für die Zukunft nicht ausschließen. Der gezielten Zerstörung mit verschiedensten Waffensystemen kann technisch kaum vorgebeugt werden. Deshalb schließen viele Untersuchungen zur Sicherheit von Entsorgungsanlagen für

hochradioaktive Abfälle kriegerische Ereignisse weitgehend aus. Ins Ideenfeld wurde dennoch ein Kriegsszenarium aufgenommen, um ein möglichst breites Spektrum von Szenarien abzubilden. Im vorliegenden Szenarium sind Informationen über das Endlager verfügbar. Waffentechnologisch erscheint es bereits aus heutiger Sicht in Reichweite.

Angriffe, die ggf. radiologische Kontaminationen und dauerhafte volkswirtschaftliche Schäden nach sich ziehen, sind am ehesten in einem Krieg denkbar, der bereits eine sehr hohe Eskalationsstufe erreicht hat. Unter Umständen würde in einer solchen Situation der Einsatz von taktischen Kernwaffen (falls verfügbar) der Zerstörung des Endlagers vorgezogen, falls eine radiologische Kontamination beabsichtigt ist. Die Plausibilität des Szenariums wird als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen. Dauerhafter Kompetenzerhalt zur nuklearen Entsorgung.

Quellen: Treiber schwerer gesellschaftlicher Konflikt (Krieg); Thränert 2018; Allied Command Transformation 2016.



Paradigmenwechsel

- Das Endlager soll geleert und saniert werden.

Szenarium: Das Ziel einer nachhaltigen Entwicklung wurde in Deutschland erfolgreich weiterverfolgt. Dazu gehört eine konsequente Kreislaufwirtschaft, wie sie sich bereits während der Errichtung des Endlagers mit Konzepten wie Urban Mining 4.0 anbahnte. Während Jahrzehnten wurden alle Deponien zurückgebaut und Altlasten saniert. Als letzter markanter Überrest vergangener «Fehlentwicklungen» ist nur noch das Endlager für hochradioaktive Abfälle zurückgeblieben. Nun steht endlich eine sichere technologische Möglichkeit zur Verfügung, auch die hochradioaktiven Abfälle in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Die Gemeinschaft, auf deren Territorium das Lager für hochradioaktive Abfälle liegt, entschließt sich, die letzte große Deponie rückzubauen und zu sanieren.

Die Sanierung der Deponie «Endlager» erweist sich allerdings als sehr aufwändig. Obwohl sie überwiegend von Robotern durchgeführt wird, kommt es zu radiologischen Belastungen für Menschen und Umwelt. Die Zwischenlagerung der hochradioaktiven Abfälle, die behandelt und teilweise wiederverwertet werden sollen, trifft auf Widerstand in der betroffenen Bevölkerung. Das Großprojekt, das sich über längere Zeit hinzieht und viele Ressourcen bindet, führt auch immer wieder zu politischen Debatten.

Letztlich wird die Sanierung erfolgreich abgeschlossen. Die Frage, ob diese Aktion sinnvoll war, wird angesichts des enormen wirtschaftlichen Aufwands, der damit verbundenen radiologischen Belastungen für Menschen und Umwelt und gesellschaftlichen Konflikten, die das Projekt auslöste, von vielen rückblickend mit «Nein» beantwortet.

Merkmale: Treiber dieses Szenariums ist ein Nachhaltigkeitsverständnis, das stark auf den Schutz der Umwelt ausgerichtet ist. Gesellschaft und Technologie haben sich in eine Richtung weiterentwickelt, die aus heutiger Sicht überwiegend positiv bewertet wird. Damit folgt das Szenarium am ehesten der Zukunftserzählung «Fortschritte der Menschheit». Informationen über das Endlager sind verfügbar. Die Risiken, die sich mit der Sanierung des Endlagers verbinden, werden jedoch unterschätzt. Ein Grund unter anderen dafür könnte Kompetenzverlust im Bereich der nuklearen Entsorgung sein.

Das Szenarium weist Ähnlichkeiten mit dem Szenarium «Alle werden gewinnen» auf, ist jedoch allgemeiner angelegt und führt zu einem besseren Ergebnis. Seine Plausibilität wird wie diejenige von «Alle werden gewinnen» als mittel eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Narrative, Framing und Dokumentationen, die den Umweltschutzcharakter des Endlagers betonen. Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Dauerhafter Kompetenzerhalt zur nuklearen Entsorgung.

Quellen: Treiber Richtungswechsel der Umwelt- und Energiepolitik. Trends Automatisierung und Robotik, Kreislaufwirtschaft, nachhaltige Entwicklung, Umweltschutz; ITA AIT 2019 – 053.



Pflugscharen zu Schwertern

➤ Am Standort des Endlagers eskaliert Protest.

Szenarium: Am Standort des Endlagers wurden ein Forschungszentrum und ein Erlebnispark eingerichtet, um Nachteile für die regionale Bevölkerung dauerhaft zu kompensieren. Am Rand des Erlebnisparks findet sich ab und zu eine kleine Gruppe von Demonstrierenden ein. Sie waren dafür eingetreten, am Standort des Endlagers ein Mahnmal der gescheiterten Technologien zu errichten, bezeichnen sich selbst als «Atompriesterschaft» und machen, obwohl nur aus wenigen Personen bestehend, gelegentlich mit medienwirksamen Aktionen auf sich aufmerksam.

Der gesellschaftliche Zusammenhalt in Deutschland ist geschwunden. Starke gesellschaftliche Gruppen mit divergierenden Werthaltungen haben sich herausgebildet. Einige dieser Gruppen stehen sich unversöhnlich gegenüber. Globale Entwicklungen wie der Klimawan-

del haben zu einer Häufung von Krisen geführt. Viele Menschen haben ihre Lebensperspektiven und ihre Existenzgrundlagen bereits dahinschwinden sehen, andere fürchten sich vor dem Abstieg. Die Flucht in virtuelle Realitäten oder psychoaktive Substanzen ist zu einem schwerwiegenden gesellschaftlichen Problem geworden; psychische Erkrankungen häufen sich. Ohnmacht und Überforderung entladen sich in Wut und Radikalisierung.

Bei einer Auseinandersetzung mit der Polizei wird die Sprecherin der Atompriester verletzt und stirbt wenig später. An diesem Ereignis entzündet sich eine deutschlandweite Protestbewegung. Die Umgebung des Endlagers wird besetzt, das Lager «in Geiselhaft» genommen. Um den politischen Druck zu erhöhen, zerstören die Besetzer zunächst das Forschungszentrum und den Erlebnispark, schwere Baumaschinen, Bohrgeräte und Hydraulikhämmer werden aufgefahren, Sprengladungen gezündet. Um eine Eskalation zu vermeiden, greift die Polizei auf dem besetzten Gelände lange nicht ein. Eine Bestandsaufnahme der entstandenen Schäden wird erst gemacht, als es gelingt, den Konflikt allmählich beizulegen. Bisher hatten Experten argumentiert, dass das Endlager geschützt im tiefen Untergrund weiterhin sicher sei. Jetzt zeigt sich aber, dass es aufgrund der Vielzahl und der Unterschiedlichkeit der Einwirkungen in den Untergrund, die zudem nicht dokumentiert oder messtechnisch begleitet worden sind, nicht mehr möglich ist, die Sicherheit des Endlagers zweifelsfrei zu bestätigen. Aufwändige Abklärungen müssen getroffen, ggf. Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden, falls nicht ein längerfristig beeinträchtigter Schutz von Menschen und Umwelt in Kauf genommen wird.

Merkmale: Das Szenarium folgt der Zukunftserzählung «Krieg und Konflikt», verweist aber auch in Richtung der Erzählung «Demokratieverlust». Spannungen sind in diesem Szenarium nicht wie in den Szenarien «Hybrider Angriff» oder «Organisierter Gewaltkonflikt» mit anderen Nationen, sondern im Inneren der Gesellschaft entstanden. Das Szenarium setzt voraus, dass der Endlagerstandort eine hohe symbolische Bedeutung für manche Bevölkerungsgruppen erlangt hat. Informationen zum Endlager sind verfügbar. Der technologische Entwicklungsstand entspricht dem heutigen oder ist weiter fortgeschritten. Die Plausibilität eines Angriffs auf das Endlager von der Erdoberfläche aus wird aufgrund der selbstzerstörerischen Tendenzen, die darin aufscheinen, und der bescheidenen Erfolgschancen als gering eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Narrative, Framing und Dokumentationen, die den Umweltschutzcharakter des Endlagers betonen. Faire Verfahren und Partizipation, zum Beispiel bei der Standortauswahl oder der Gestaltung der Oberflächenanlagen, die dazu beitragen, dass das Endlager im Rückblick positiv konnotiert wird. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können.

Quellen: Treiber schwere gesellschaftliche Konflikte, Verfall staatlicher Ordnung, Entstehung rechtsfreier Räume; WEF 2019; Sebeok 1984.



Riss-System

- Untertägige Energiespeicher verursachen Probleme.

Szenarium: Klimawandel, Energiewende und Digitalisierung haben den Bedarf an Speicherplatz im Untergrund stark ansteigen lassen. Treibhausgase werden in großen Mengen abgeschieden und untertage gelagert, Energieträger zwischengespeichert. Die Notwendigkeit solcher Speicher ist breit anerkannt, nachdem sich die Auswirkungen des Klimawandels immer deutlicher bemerkbar machten und wiederkehrende Black-Outs und andere Engpässe bei der Energieversorgung erhebliche Schäden nach sich zogen.

Hohe Priorität beim Schutz von Anlagen untertage haben die Datenspeicher erlangt. Die umfassende Digitalisierung hat zu einem starken Anwachsen der zu speichernden Informationen geführt. Der Betrieb untertägiger Datenspeicheranlagen ist zu einem blühenden Geschäft geworden. Ebenso wie die Elektrizitätsversorgung wird die Datenspeicherung als kritische Infrastruktur betrachtet, deren Schutz einen hohen politischen Stellenwert genießt.

Aufgrund einer Verkettung ungünstiger Umstände wird ein Speicher für Energieträger im Umfeld des Endlagers wiederholt nicht korrekt befüllt. Risse bilden sich, breiten sich aus und finden Anschluss an natürliche Bruchzonen, bis ein Kluftsystem entstanden ist, das eine Verbindung ins Endlager hinein herstellt. Dort reicht die Wärme, die die hochradioaktiven Abfälle entwickeln, als Aktivierungsenergie aus, um chemische Reaktionen des Energieträgers auszulösen, die zu unkontrollierten weiteren chemischen Veränderungen im Umfeld der Abfälle führen. Der Energiespeicher wird beschädigt und die Sicherheit des Endlagers ist beeinträchtigt. Um die Langzeitsicherheit wiederherzustellen, muss das Lager aufwändig saniert werden. Ansonsten können gesundheitliche Beeinträchtigungen bei Menschen und Umweltschäden eintreten.

Merkmale: Das Szenarium folgt im Wesentlichen der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart». Dem Szenarium liegen Knappheit an stofflichen Ressourcen und Energie sowie hohe Anforderungen an ein erfolgreiches Management dieser Ressourcen zugrunde. Der Stellenwert der Sicherheit des Endlagers hat abgenommen, da die Gesellschaft inzwischen – teilweise notgedrungen – andere Prioritäten setzt. Informationen zum Endlager sind vorhanden. Technologisch hat im Vergleich zur heutigen Situation eine Weiterentwicklung stattgefunden. Die Plausibilität des Szenariums, das gegenwärtig absehbare Entwicklungen fortschreibt, wird als hoch eingestuft.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können. Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren.

Quellen: Treiber Entwicklung und Anwendung neuer Technologien, Mangel an Rohstoffen und Energie; Trends Energiewende, Klimaanpassung; NEA 2019, 41 und 109.



Talsperre der Zukunft

- Ein großes Bauwerk verändert die Verhältnisse im Untergrund.

Szenarium: Seit der Stilllegung des Endlagers sind Jahrzehnte vergangen. Die Informationen zum Endlager sind in Archiven verschwunden und in der Gesellschaft nicht mehr präsent. Menschliche Einwirkungen und natürliche Prozesse und Ereignisse haben die Erdoberfläche verändert.

Im näheren Umfeld des Endlagers wird eine große Talsperre (oder ein anderes Speicherbauwerk) errichtet, deren Ausmaße das heute in Deutschland Übliche noch deutlich überschreiten. Mit den Staudämmen oder -mauern, dem aufgestauten Wasser und Sedimenten, die sich am Grund der Talsperre ansammeln, wirken erhebliche zusätzliche Lasten auf den Untergrund ein. Die entsprechenden Kräfte müssen vom Untergrund aufgenommen werden. Damit dies mit ausreichender Sicherheit gelingt und zum Abfangen von Auftriebskräften werden bauliche Veränderungen vorgenommen, die in den Untergrund hineinwirken, zum Beispiel die Injektion von stabilisierenden Materialien in den Untergrund.

Am Standort der Talsperre treten Veränderungen an Grundwasser und Oberflächengewässern auf. Die Lasten, die auf den geologischen Untergrund, in dem sich das Endlager befindet, einwirken, vergrößern sich. Schwallwasserbildung verstärkt die Erosion an der Erdoberfläche. Im Verbund mit weiteren menschlichen Aktivitäten, die den geologischen Untergrund betreffen, wird die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigt.

Merkmale: Bei Betrachtungen zur Langzeitsicherheit des Endlagers hat dieses Szenarium schon früh Stellenwert erlangt. Technologisch setzt es keine Fortschritte voraus und entspricht daher dem international verfolgten Grundsatz für Safety Cases, vor allem Szenarien zu betrachten, die derzeit üblichen menschlichen Aktivitäten entsprechen. Ein wesentliches Merkmal dieses Szenariums ist, dass die Information zum Endlager und seinem Standort verloren gegangen sind.

Das Szenarium basiert auf der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart». Seine Plausibilität wird als gering eingeschätzt, weil es sowohl voraussetzt, dass die Information zum Endlager bereits nach relativ kurzer Zeit «verloren gegangen» ist, als auch, dass ein ungewöhnlich aufwändiges Bauwerk ausgerechnet im näheren Umfeld des Endlagers errichtet wird.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen.

Quellen: Treiber Mangel an Rohstoffen und Energie; STK 2021; EndlSiAnfV 2020b, 34; NEA 2019, 43; Hora & Winterfeldt 1997, 165.



TECTribes

➤ Technikaffine Gruppen regieren sich selbst.

Szenarium: Seit dem Verschluss des Endlagers hat sich der Gebrauch unterschiedlichster Technologien weiter intensiviert. Menschen sind Teil von Netzwerken geworden, die teils biologisch, teils elektronisch funktionieren und miteinander kommunizieren. Reale und virtuelle Welten gehen ineinander über. Menschen planen, entscheiden und handeln zunehmend gemeinsam mit Co-Robotern, in der Umwelt sind Biobots unterwegs.

Die Zugehörigkeit zum eigenen Netzwerk oder «Tribe» überwiegt die Zugehörigkeit zu einem staatlichen System für den und die Einzelne bei weitem an Bedeutung. Wahrgenommen wird vor allem, was sich im eigenen Tribe ereignet. Kontakte mit anderen Tribes sind reduziert, da deren andersartige Werthaltungen und Vorlieben als minderwertig bis bedrohlich und potenziell konfliktstiftend angesehen werden.

Eine Beziehung zwischen den Tribes kommt allerdings durch den Wettbewerb um seltene Ressourcen und um Innovationen zustande. Nachdem der besonders Technologie-affine TECTribe das Endlager als potenziell vielversprechende Ressource entdeckt hat und zu explorieren beginnt, beobachten andere Tribes das Geschehen zunehmend aufmerksam. Einige äussern massive Kritik an der riskanten Exploration durch den TECTribe, andere erheben selbst Anspruch auf die Ressource oder sehen den TECTribe bereits im Voraus an der anspruchsvollen Aufgabe scheitern, die Ressource auszubeuten.

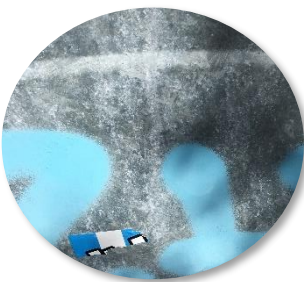
Da sich der TECTribe durch andere Tribes zunehmend bedrängt sieht, entschließt er sich zu einer Vorwärtsstrategie: Die Energieträger im Endlager sollen von ihm genutzt werden, zum Beispiel in kleinen Kernreaktoren, auch um den Preis von Schäden, jetzt oder in der Zukunft. Für eventuell auftretende Probleme wird sich eine technologische Lösung finden lassen. Beim Eröffnen und Ausbeuten des Endlagers treten Umweltschäden auf.

Merkmale: Das Szenarium basiert auf der Zukunftserzählung «Demokratieverlust». Die Gesellschaft ist in Gruppen zerfallen, die ein weitgehend autonomes «Stammesleben» führen. Zumindest einige dieser Gruppen sind von Technikoptimismus geleitet. Informationen zum Endlager sind verfügbar. Technologisch hat im Vergleich zur Gegenwart eine Weiterentwicklung stattgefunden. Die Plausibilität des Szenariums wird als gering eingeschätzt,

weil sich Tribalisierung ungünstig auf den ebenfalls postulierten technologischen Fortschritt auswirken dürfte. Bisher profitieren Forschung und Entwicklung wesentlich von nationaler und internationaler Kooperation und der Möglichkeit, technologische Innovationen auf einer Vielzahl von Märkten absetzen zu können.

Wichtigste länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Dauerhafter Kompetenzerhalt zur nuklearen Entsorgung.

Quellen: Treiber Verfall staatlicher Ordnung, Entstehung rechtsfreier Räume; GAO 2017; Kehl & Coenen 2016; Zukunftsinstitut oJ.



Verdichtung

- Die Überdeckung des Endlagers wird abgebaut.

Szenarium: Seit dem Verschluss des Endlagers hat Deutschland einige Krisen und Aufschwünge erlebt. Über den wechselnden Herausforderungen und Entwicklungsschüben ist das Wissen um das Endlager weitgehend in Vergessenheit geraten. Nahezu das gesamte Land ist dicht besiedelt – unter anderem aufgrund eines wirtschaftlichen Aufschwungs, der Arbeitskräfte aus aller Welt anzieht, aber auch, weil sich die Folgen des Klimawandels in Mitteleuropa weniger stark bemerkbar machen als in anderen Regionen der Welt und mit Anpassungsaktivitäten wirksam bewältigt werden konnten.

Das Bevölkerungswachstum in Deutschland zieht rege bauliche Aktivitäten nach sich. Raum ist ebenso wie Baumaterialien knapp geworden. Noch ist die Region über dem Endlager relativ dünn besiedelt. Daher entscheiden Politik und Wirtschaft in einer großangelegten öffentlich-privaten Partnerschaftsaktion, in der Nähe des ehemaligen Endlagerstandorts im Tagebau Baumaterialien zu gewinnen. Anschließend wird auf dem Grund des Tagebaus eine neue Siedlung errichtet, die weit in die Höhe wächst. Nach dem Grundsatz der «Raumentwicklung nach innen» und innovativen Konzepten zu «Condensed Spaces» folgend wird die Siedlung hochgradig verdichtet angelegt.

Als am Rand des Planungsprozesses das alte Endlager ins Spiel gebracht wurde, fällt die pragmatische Entscheidung, die Siedlungsfläche durch eine Basisabdichtung gegenüber dem Endlager abzusichern. In der Tagebauphase wird die Überdeckung des Endlagers teilweise abgebaut, die Grundwasserverhältnisse wandeln sich tiefgreifend. Die auf den Untergrund einwirkenden Kräfte verändern sich auch im Zug der darauffolgenden baulichen Aktivitäten. Die Barrieren des Endlagers werden beeinträchtigt; die Basisabdichtung erweist sich als auf Dauer untaugliches Instrument. Längerfristig ist der ursprünglich angestrebte Schutz von Menschen und Umwelt nicht mehr gewährleistet.

Merkmale: In diesem Szenarium werden Erfahrungen aus dem Tagebau in Deutschland aufgegriffen und mit dem Trend zu verdichteten Siedlungsräumen verbunden. Im Wesentlichen folgt es der Zukunftserzählung «Fortschreibung der Gegenwart». Wie in anderen Szenarien auch ist die Aufmerksamkeit für die Sicherheit des Endlagers zurückgegangen. Mit der Basisabdichtung wird eine Lösung gesucht, um das Sicherheitsproblem verhältnismäßig einfach und kostengünstig, aber nicht nachhaltig wirksam aus der Welt zu schaffen. Die Plausibilität dieses Szenariums wird als gering eingeschätzt, da es einen aufwändigen Tagebau voraussetzt, der dann auch noch spezifisch im Umfeld des Endlagers stattfinden muss.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren. Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen.

Quellen: Treiber Überbevölkerung, Migration, Mangel an Raumreserven, Umweltveränderungen, Klimawandel; Trends Klimaanpassung, Urbanisierung.



Verzweifelte Suche

➤ Menschen suchen nach den mythischen Relikten einer vergangenen Zeit.

Szenarium: Nach dem Verschluss des Endlagers ist eine schwere Krise eingetreten. Tiefgreifende Umweltveränderungen und gesellschaftliche Konflikte haben über Jahrzehnte viele Ressourcen gebunden und die Menschheit in ihrer kulturellen, technologischen und wirtschaftlichen Entwicklung zurückgeworfen.

Dokumentiertes Wissen aus der Vorkrisenzeit ist zum Teil noch vorhanden. Aufgrund mangelnder technologischer Kompetenzen und Ressourcen, zum Beispiel zum Dekodieren alter digitalisierter Dokumente, kann es jedoch oft nicht mehr gelesen werden. Zudem ist viel Fachwissen verloren gegangen. Kerntechnik ist ein Begriff, der zwar vereinzelt auftaucht, mit dem Menschen aber kaum noch konkrete Informationen verbinden.

Technologisch baut die Menschheit auf wenigen Kompetenzen auf, die sich über die Krisenjahre als notwendig erwiesen haben und daher erhalten geblieben sind. Dazu gehören Techniken des Untertagebaus, die unter anderem benötigt wurden, um Schutzbauten während kriegerischer Konflikte zu errichten oder letzte, wenig ergiebige Lagerstätten von Ressourcen wie Steinkohle und Eisen auszubeuten. Energetische und stoffliche Ressourcen sind knapp.

Aus ferner Zeit ist die eher vage, mythische Information erhalten geblieben, dass an einem bestimmten Standort ein Lager mit wertvollen Ressourcen im Untergrund zu finden sei. Erhalten geblieben ist auch eine Ahnung von Gefahr. Aufgrund der jüngeren Vorgeschichte haben sich die Menschen jedoch daran gewöhnt, mit Gefahren zu leben und Risiken einzugehen, um das kurzfristige Überleben zu sichern. Daher dringen sie nun mit Untertagebautechniken ins Lager vor. Leben und Gesundheit von Menschen werden beeinträchtigt, insbesondere der Menschen, die ins Lager vordringen. Umweltschäden treten auf.

Merkmale: Das Szenarium folgt der Zukunftserzählung «Niedergang der Menschheit» und spielt sich im Übergangsbereich zwischen beabsichtigtem und nicht-beabsichtigtem Eindringen ab. Informationen über das Endlager sind nur noch rudimentär verfügbar. Technologisch ist das Szenarium bereits heute möglich. Die spezifische Kombination von Informationsverlust und Interesse an einer Nutzung des Lagerinventars dürfte wahrscheinlicher sein als die Kombination von Datenverfälschung und Interesse an einer Nutzung des Lagerinventars im Szenarium «Gedächtnisverfälschung». Die Plausibilität des Szenariums wird daher als mittel eingeschätzt.

Wichtige länger wirksame Ansätze, um die Robustheit des Lagers zu stärken, sind: Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren. Einfaches Lagerkonzept unter Verwendung weit verbreiteter Materialien. Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellm Vortrieb erkannt werden kann.

Quelle: Treiber Mangel an Rohstoffen und Energie; Hora & Winterfeldt 1997, 157.

4. Optimierung und Robustheit

Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten lassen sich nutzen, um ein Endlagersystem zu optimieren und seine Robustheit zu prüfen.

Entwicklungen, die durch zukünftige menschliche Aktivitäten, insbesondere durch unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, ausgelöst werden und für die Sicherheit des Endlagersystems relevant werden können, sind der EndSiAnfV zufolge zu berücksichtigen, wenn das Endlagersystem optimiert und dessen Robustheit überprüft wird. Als Referenzentwicklungen dienen Entwicklungen, die «durch derzeit übliche menschliche Aktivitäten ausgelöst werden können» (EndSiAnfV 2020a, §3(7)).

Das Ideenfeld bildet zukünftige menschliche Aktivitäten ab, die für die Sicherheit eines Endlagers relevant werden können und von denen zumindest einige bereits derzeit üblichen Aktivitäten entsprechen. Der Stresstest schließt daher in Anlehnung an die EndSiAnfV mit einigen grundsätzlichen Überlegungen zur Optimierung und Robustheit eines Endlagersystems ab.

Im Ideenfeld wurden unterschiedliche Einwirkungen auf ein verschlossenes Endlager betrachtet. In Tabelle 1 sind alle Einwirkungen aufgeführt, die in den Szenarien auftreten und beim Zustandekommen von Schäden eine führende Rolle spielen. Das Spektrum dieser Einwirkungen reicht von der biologischen Aktivität von Mikroorganismen bis zum geplanten Wiedereröffnen des Endlagers unter Verwendung neuer Technologien. Der gezielte Einfluss menschlicher Aktivitäten auf das Endlager nimmt in der Tabelle von oben nach unten zu.

Wo menschliche Aktivitäten im Spiel sind, werden Barrieren und Sicherheitsfunktionen teilweise mit Absicht, teils unbeabsichtigt beeinträchtigt. Szenarien, deren Einordnung in die Kategorien «beabsichtigt» und «nicht-beabsichtigt» nicht eindeutig ist, wird eine «bedingte» Absicht zugewiesen.

Überwiegende Art der Einwirkung	Überwiegende oder vermutete Richtung der Einwirkung	Absicht	Szenarien
Biologisch	diffus	nein	Infiltration
Chemisch	diffus	nein	Riss-System
Physikalisch (unspezifisch)	von oben	nein	Fataler Fehler
Krafteinwirkung	von oben von oben von oben	nein ja nein	Absturz Organisierter Gewaltkonflikt Talsperre der Zukunft

Überwiegende Art der Einwirkung	Überwiegende oder vermutete Richtung der Einwirkung	Absicht	Szenarien
Anbohren	unbestimmt unbestimmt von oben von oben von oben	bedingt nein bedingt nein bedingt	Blumenkinder Die Maulwurfmaschine Gedächtnisverfälschung Gold Rush Verzweifelte Suche
Tagebau	von oben	nein	Verdichtung
Vielfältige Aktivitäten im Untergrund	diffus diffus diffus von unten von oben/seitlich von oben	bedingt nein nein nein ja ja	Darwinismus im Untergrund Drift into failure Einsturz Fokus Tiefe Ökokollaps Pflugscharen zu Schwertern
Vollständiges oder teilweises Öffnen des Endlagers	von oben von oben von oben von oben unbestimmt unbestimmt unbestimmt	ja ja bedingt bedingt ja ja ja	Alle werden gewinnen Deinococcus habilis Fehlalarm Hybrider Angriff Menschheit 2.0 Paradigmenwechsel TECTribes

Tabelle 1: Szenarien und Einwirkungen auf das verschlossene Endlager

Dabei ist zu beachten, dass ausschließlich Szenarien betrachtet wurden, die die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen können, und es sich daher um eine sehr spezifische Auswahl möglicher Einwirkungen handelt. Die meisten Szenarien beinhalten Entwicklungen, die zwar nicht gänzlich unplausibel aber aus heutiger Perspektive unwahrscheinlich sind, zum Beispiel einen Tagebau oder die Errichtung einer Talsperre im näheren Umfeld des Endlagers.

In den Szenarien kommt es häufig nicht (nur) zu einer akuten Schädigung von Menschen und Umwelt. Die Schwächung von Barrieren und die Beeinträchtigung von Sicherheitsfunktionen machen sich vielmehr erst verzögert mit gesundheitlichen Beeinträchtigungen von Menschen und Umweltschäden bemerkbar (vgl. Tabelle 2):

Einwirkung ionisierender Strahlung auf Menschen	Szenarien
Geplant	Alle werden gewinnen, Deinococcus habilis, Fehlalarm, Hybrider Angriff, Menschheit 2.0, Paradigmenwechsel, TECtribes
Unmittelbar und überraschend	Blumenkinder, Gedächtnisverfälschung, ggf. Gold Rush, Organisierter Gewaltkonflikt, Verzweifelte Suche
Zeitlich verzögert	Alle Szenarien außer Blumenkinder und Paradigmenwechsel, die eine erfolgreiche Sanierung des Endlagers explizit beinhalten

Tabelle 2: Unmittelbare und verzögerte Einwirkung ionisierender Strahlung auf Menschen und Umwelt in den Szenarien

Geplante Aktivitäten können zur Einwirkung ionisierender Strahlung auf Menschen führen, falls sie nicht weitgehend automatisiert und/oder begleitet von wirksamen Maßnahmen zum Strahlenschutz erfolgen. Zeitlich verzögert wirkt ionisierende Strahlung auf Menschen ein, falls nicht rechtzeitig eine Sanierung des Endlagers vorgenommen wird. Im Fall einer erfolgreichen Sanierung findet eine Verlagerung von «zeitlich verzögerten» zu «geplanten» Einwirkungen während des Sanierungsprozesses statt.

Für die Einschätzung der Plausibilität der Szenarien sind vor allem die Stärke der zugrundeliegenden Treiber, die Wahrscheinlichkeit zentraler Elemente bzw. Kombinationen von Elementen der Szenarien aus heutiger Sicht und der gewählte Zeithorizont von etwa hundert Jahren ausschlaggebend. Fünf Szenarien wurden der Kategorie «hohe Plausibilität», acht der Kategorie «mittlere Plausibilität» und zwölf der Kategorie «geringe Plausibilität» zugeordnet (vgl. Tabelle 3):

Plausibilität aus heutiger Perspektive	Themen (Szenarien)
hoch	<ul style="list-style-type: none"> • Nicht-sicherheitsgerichtete Nutzung des Untergrunds (Darwinismus im Untergrund, Drift into failure, Riss-System) • Gescheiterter Versuch, das Endlager besser zu überwachen (Deinococcus habilis, Fehlalarm)
mittel	<ul style="list-style-type: none"> • Unfall, der zu erheblicher Krafteinwirkung auf die Erdoberfläche über dem Endlager führt (Absturz) • Gescheiterter oder fragwürdiger Versuch, das Endlager zu räumen und zu sanieren (Alle werden gewinnen, Paradigmenwechsel) • Gezieltes Hervorrufen von Verunsicherung zum Zustand des Endlagers (Hybrider Angriff) • Verlust der Kontrolle über autonome Technik (Die Maulwurfmaschine) • Einwirkungen auf das Endlager durch Nutzung des ultra-tiefen Untergrunds (Fokus Tiefe) • Suche nach Rohstoffen im Endlager (Verzweifelte Suche) • Vordringen von Mikroorganismen, die im Endlager Lebensgemeinschaften bilden und die Sicherheit beeinträchtigen (Infiltration)
gering	<ul style="list-style-type: none"> • Naives Eindringen ins Endlager (Blumenkinder) • Eindringen ins Endlager aufgrund nicht-korrektur Information (Gedächtnisverfälschung) • Eindringen zum Abbau einer Ressource unter dem Endlager (Gold Rush) • Überstürzte Ausbeutung des Endlagers zur Energienutzung (TECTribes) • Einwirkung einer bisher unbekannten Technologie (Fataler Fehler) • Kollabieren großer unterirdischer Räume (Einsturz) • Tiefgreifende bauliche Aktivitäten im Umfeld des Endlagers (Talsperre der Zukunft, Verdichtung) • Angriff auf das Endlager aus dem Untergrund oder von der Erdoberfläche aus in einer schweren Konfliktsituation (Ökokollaps, Organisierter Gewaltkonflikt, Pflugscharen zu Schwertern) • Provokation, ausgehend von Menschen mit verminderter Empfindlichkeit gegenüber ionisierender Strahlung (Menschheit 2.0)

Tabelle 3: Einschätzung der Plausibilität der Szenarien

In Abbildung 9 sind die Szenarien in gesellschaftliche Kontexte eingeordnet dargestellt. Die Einordnung beruht auf charakteristischen Merkmalen der Szenarien. Da sie qualitativ erfolgt, ist sie jedoch notwendigerweise von einem gewissen Maß an subjektiver Einschätzung geprägt.

In der Abbildung nimmt die Krisenhaftigkeit der gesellschaftlichen Situation, die dem Szenarium zugrunde liegt, von unten nach oben zu. An der Basis sind Szenarien eingeordnet, die innen- und aussenpolitisch von Frieden und Stabilität gekennzeichnet sind. Am oberen Rand der Abbildung liegen Szenarien, die von innen- oder aussenpolitischen Konflikten geprägt sind.

Auf der linken Seite der Abbildung sind Szenarien eingeordnet, die sich bereits in der Gegenwart oder in der nahen Zukunft abspielen könnten. Auf der rechten Seite befinden sich Szenarien, die aus gegenwärtiger Sicht weiter in der Zukunft einzuordnen sind, zum Beispiel weil ein Szenarium eine erhebliche Weiterentwicklung von Technologien oder tiefgreifende politische Veränderungen voraussetzt.

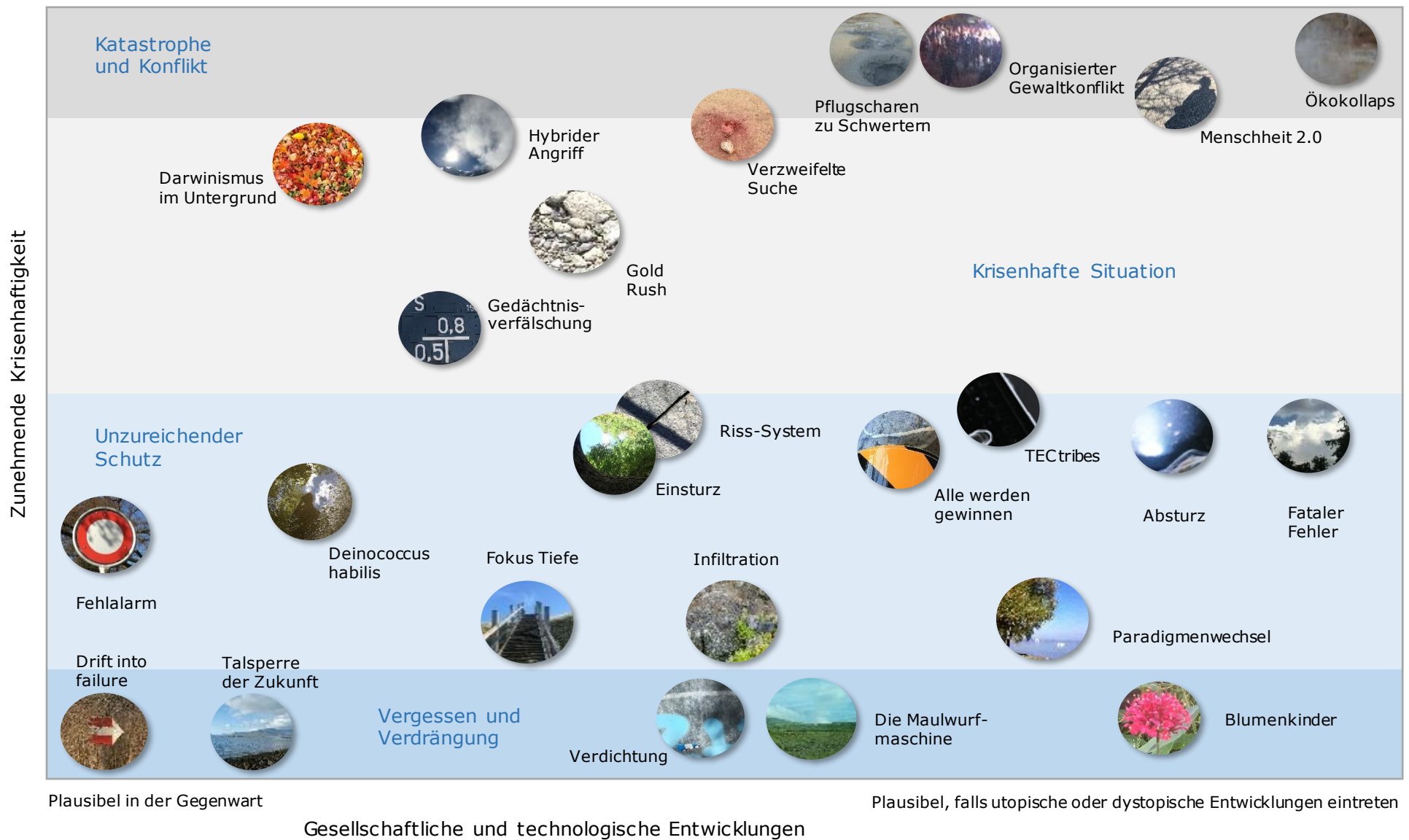


Abbildung 9: Einordnung der Szenarien in gesellschaftliche Kontexte

Mitte der 1990er Jahre wurde in den USA eine aufwändig angelegte Untersuchung zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in ein verschlossenes Endlager durchgeführt. Dazu wurden vier interdisziplinär besetzte Expertenteams gebildet, die unterschiedliche Methoden der Szenarienentwicklung einsetzten.

Die Studie wies auf die zentrale Bedeutung von vier Themen hin: die Erhaltung bzw. den Verlust von Erinnerung an die radioaktiven Abfälle, den Erfolg bzw. das Scheitern staatlicher Kontrolle am Standort eines Endlagers, die Geschwindigkeit technologischer Fort- bzw. Rückschritte und die Ungewissheit über die Notwendigkeit, künftig bestimmte Ressourcen zu explorieren (Hora & Winterfeldt 1997).

Im Stresstest wurde der Zeithorizont weniger weit gespannt als in der Studie aus den 1990er Jahren. Der Stresstest ist generell auf menschliche Aktivitäten ausgerichtet, die zu Schäden am Endlager führen können, während die frühere Studie auf menschliches Eindringen fokussierte. Beide Untersuchungen unterscheiden sich zudem aufgrund der angewendeten Methoden, des kulturellen Hintergrunds und der Zeit, zu der sie vorgenommen wurden. Entsprechend überlagern sich auch die Resultate des Stresstests nur teilweise mit den Resultaten aus den 1990er Jahren.

Zentrale Ergebnisse des Stresstests sind:

- Aus gegenwärtiger Perspektive ist die Sicherheit des verschlossenen Endlagers am ehesten durch Aktivitäten von Menschen im Untergrund bedroht. Wichtige Treiber für solche Aktivitäten sind Mangel an Rohstoffen und Energie sowie der Klimawandel.
- Einwirkungen, die zu einer allmählichen, diffusen Schwächung von Barrieren führen, bleiben ggf. lange unbemerkt und beeinträchtigen den Schutz von Menschen und Umwelt mit erheblicher zeitlicher Verzögerung.
- Neben der gesundheitlichen Beeinträchtigung von Menschen und Umweltschäden sind wesentliche volkswirtschaftliche Schäden möglich, vor allem wenn Zweifel an der Sicherheit des Endlagers invasive Untersuchungen erforderlich machen oder eine Sanierung des Endlagers erforderlich wird, um Menschen und Umwelt zu schützen.
- Ob Aktivitäten «beabsichtigt» oder «nicht-beabsichtigt» zu Schäden am Endlager führen, lässt sich oft nicht eindeutig bestimmen.
- Die gesellschaftliche Wahrnehmung des Endlagers ist sicherheitsrelevant. Informiertes Vertrauen in das Lager, das beispielsweise durch einen wertschätzenden Umgang und aktiven Dialog der Stakeholder gekennzeichnet ist, stärkt die Sicherheit. Die Sicherheit ist beeinträchtigt, wenn der Endlagerstandort als Mahnmal für Verfehlungen und Konflikt wahrgenommen wird oder die Existenz des Lagers und die mit ihm verbundenen Risiken verdrängt werden.
- Das Nichtwissen darum, wie sich das verschlossene Endlager im tiefen Untergrund weiterentwickelt, kann zum Problem für die Sicherheit von Menschen und Umwelt werden, wenn es zu unnötigen «Rettungsaktivitäten» führt oder genutzt wird, um Verunsicherung hervorzurufen.
- Ansatzpunkte, um die Sicherheit des verschlossenen Endlagers zu stärken, liegen auf verschiedenen Ebenen. Manche sind technisch-naturwissenschaftliche Herausforderungen, andere betreffen gesellschaftliche Strukturen und Prozesse. Eine Systematisierung, die die verschiedenen Ebenen einbezieht, ist daher ein wichtiger weiterführender Schritt.

Die im Ideenfeld vorgestellten Szenarien zeigen einige grundlegende Anhaltspunkte dafür auf, wie die Sicherheit des Endlagersystems soziotechnisch optimiert bzw. die Robustheit des Endlagersystems verbessert werden kann:

- Positive Bewertung einer großen Tiefenlage bzw. Überdeckung im Standortauswahlverfahren
- Einfaches Lagerkonzept unter Verwendung weit verbreiteter Materialien
- Robustheit der Barrieren gegen eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Einwirkungen – die sowohl akut als auch schleichend und diffus erfolgen können
- Wahl bzw. Gestaltung von Barrieren, die widerstandsfähig gegen mikrobielle Besiedlung, mikrobiellen Abbau und weitere schädigende Einflüsse von Mikroorganismen sind
- Berücksichtigung von Einwirkungen auf das Endlager, die aus der Tiefe oder horizontal erfolgen, bei der Optimierung der Endlagersicherheit
- Markierung eines Schutzbereichs um das Lager, der auch bei maschinellm Vortrieb erkannt werden kann
- Diversität und Redundanz der Informationen, die nach dem Verschluss des Endlagers übermittelt werden
- Übermittlung einer Dokumentation, die das Vertrauen ins Endlager nach dessen Verschluss langfristig stärkt und nachdrücklich dafür sensibilisiert, das Sicherheitskonzept des Endlagers zu respektieren
- Dauerhafter Kompetenzerhalt zur nuklearen Entsorgung, der in der Gesellschaft gut verankert ist und von ihr mitgetragen wird
- Vorbereitung von Kriterien und Maßnahmen, falls Zweifel an der Sicherheit des Endlagers entstehen
- Konsequentes Vorausplanen und Vorbereiten von Rückholung und Bergung, einschließlich einer Startstrategie, solange das Wissen darum noch vorhanden ist
- Stärkung der Identifikation der Bevölkerung am Endlagerstandort mit dem Lager
- Kompensationsmaßnahmen, die nicht dazu beitragen, dass der Endlagerstandort auf Dauer eine hohe Symbolwirkung für die Gesellschaft als Ganze oder einzelne gesellschaftliche Gruppen entfaltet
- Faire Verfahren und Partizipation, zum Beispiel bei der Standortauswahl oder der Gestaltung der Oberflächenanlagen, die dazu beitragen, dass das Endlager im Rückblick positiv konnotiert wird
- Narrative, Framing und Dokumentationen, die den Umweltschutzcharakter des Endlagers betonen. Sie sollen dazu beitragen, dass das Endlager in Zukunft weiter geschützt und nicht vergessen oder bekämpft wird.

Einige dieser Anhaltspunkte setzen eine gut funktionierende Longterm-Governance voraus.

Viele Szenarien deuten darauf hin, dass es sinnvoll ist, einen dreidimensionalen Schutzraum um das Lager auszuweisen, der für die Raumplanung sowohl unter als auch über Tage verbindlich ist. Die Ausdehnung des Schutzraums zu ermitteln, ist anspruchsvoll und

hängt nicht nur vom Wirtsgestein und den geologischen Verhältnissen rund um das Endlager, sondern auch von der Art der Einwirkungen, vor denen das Endlager geschützt werden soll, ab.

Anspruchsvoll ist auch der Umgang mit Spannungsfeldern und Widersprüchlichkeiten, die bei der Szenarienentwicklung erkennbar werden. Drei Beispiele sollen das verdeutlichen:

- Manche Szenarien legen es nahe, das Eindringen ins Endlager zu erschweren (zum Beispiel «Die Maulwurfmaschine», «Darwinismus im Untergrund»). Bei anderen erweist es sich dagegen als günstig, das Lager möglichst einfach wieder eröffnen zu können (zum Beispiel «Deinococcus habilis», «Paradigmenwechsel»).
- Einige Szenarien treten nur ein, wenn Information über den Standort und den Inhalt des Endlagers verfügbar ist (beispielsweise «Hybrider Angriff»), andere nur dann, wenn keine Information verfügbar ist (beispielsweise «Talsperre der Zukunft»). Information zum Endlager kann also sowohl sicherheitsgerichtet sein als auch die Sicherheit des Endlagers beeinträchtigen.
- Die Wahl bzw. Gestaltung von (geochemischen) Barrieren, die widerstandsfähig gegen mikrobielle Besiedlung, mikrobiellen Abbau und weitere schädigende Einflüsse von Mikroorganismen sind (Szenarium «Infiltration», Ebeling 2021) steht Ideen gegenüber, wie derjenigen, Mikroorganismen gezielt einzusetzen, um beispielsweise Wasserstoffgas aus der Korrosion von Stahl-Endlagerbehältern zu binden und damit die Sicherheit des Endlagers zu verbessern (Fischer 2018).

Falls die Information zum Endlager verloren gegangen oder verfälscht worden ist, können Markierungen vor dem Eindringen in das Endlager warnen oder zumindest dazu führen, dass Abklärungen getroffen werden, bevor über das weitere Vordringen in Richtung des Endlagers entschieden wird.

Zu künftigen menschlichen Aktivitäten, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen, werden noch viele Untersuchungen und Diskussionen geführt werden müssen. Der Stresstest soll daher vor allem zur Weiterentwicklung und zum Weiterdenken anregen.

Anmerkung

Zum Weiterdenken anzuregen, das beabsichtigte auch Paolo Fabbri. Gemeinsam mit Françoise Bastide veröffentlichte er 1984 die Idee, mit Katzen, deren Fellfarbe sich bei Vorliegen gefährlicher Radioaktivität ändert, dauerhaft vor einem Endlager zu warnen. Aus dieser Publikation, die lange Zeit vor allem wegen ihrer Ausgefallenheit zitiert wurde, ist inzwischen eine Bewegung entstanden, die das Narrativ der Strahlenkatzen teils spielerisch und kreativ, teils wissenschaftlich aufgreift (vgl. Abbildung 10). Fabbri verstand diese Bewegung vor allem als Chance, einen größeren Kreis von Menschen für diese Thematik zu interessieren, neue Ideen zu entwickeln und Diskussionen darüber zu führen, wie künftige Menschen wirksam vor den Risiken eines Endlagers gewarnt werden können:

«Have you got any ideas for how to keep a warning alive for 10,000 years?» (Fabbri 2018)

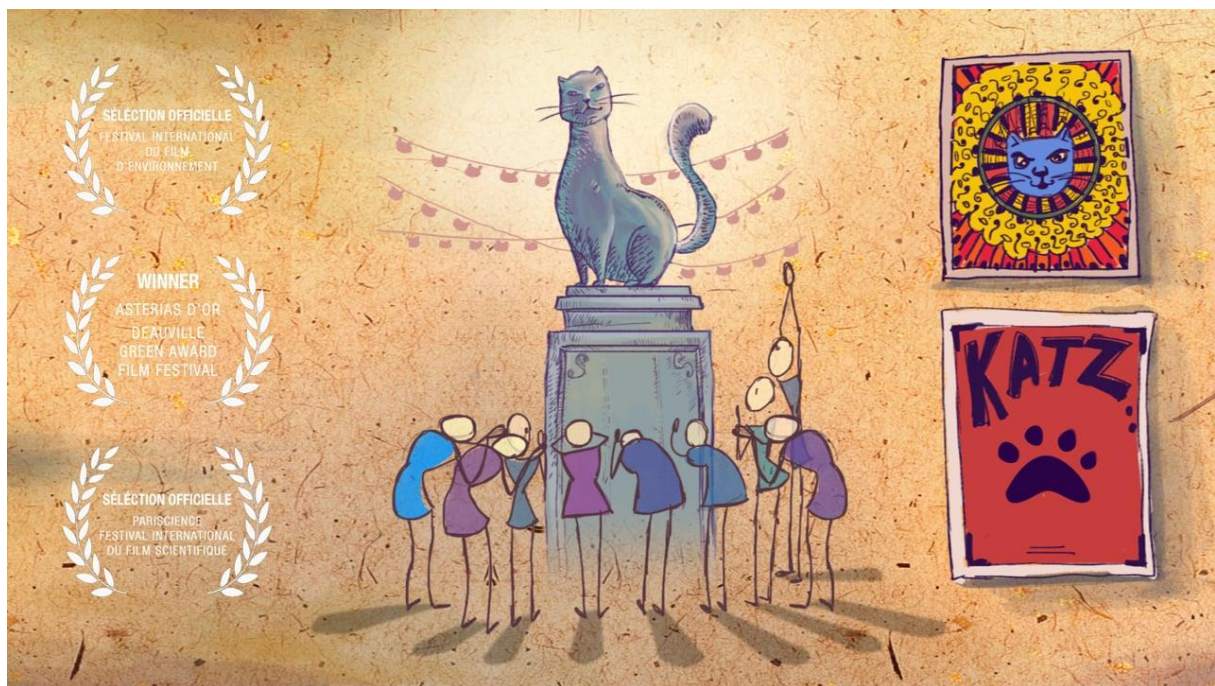


Abbildung 10: Darstellung zum Kurzfilm «The Ray Cat Solution» (Huguet 2016)

5. Fazit

Sicherheitsuntersuchungen lassen sich durch die Einbindung von Szenarien künftiger menschlicher Entwicklungen sinnvoll erweitern.

Der Umgang mit menschlichen Aktivitäten bei Langzeitsicherheitsanalysen eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle ist anspruchsvoll.

Die Ungewissheiten zu künftigen anthropogenen Entwicklungen im Bewertungszeitraum sind überwältigend und lassen sich kaum vermindern. Wissen zu menschlichen Aktivitäten in der Zukunft kann empirisch nicht überprüft werden, so dass es schwierig wird, «die Differenz zwischen Wissen und bloßem Meinen aufrechtzuerhalten» (Grunwald 2007, S. 57).

Entwicklungen künftiger menschlicher Aktivitäten sind Gegenstand von Zukunftsforschung, Foresight-Prozessen und Technikfolgen-Abschätzung, von Strategieentwicklungen und Politikberatungsstudien. Im Versuch «Stressfaktor Mensch» wurde untersucht, ob sich aus solchen Quellen Erkenntnisse herleiten lassen, die für die Optimierung des Endlagersystems und die Überprüfung seiner Robustheit nützlich sind.

Der Versuch zeigt, dass die Szenarienentwicklung voraussetzungs- und notwendigerweise interdisziplinär ist. Verschiedene methodische Ansätze müssen miteinander kombiniert, Voraussetzungen und Annahmen klar ausgewiesen werden.

Obwohl viele Details spekulativ bleiben, vermitteln Szenarien ein differenziertes Bild menschlicher Aktivitäten, die die Sicherheit des verschlossenen Endlagers beeinflussen können. Muster zeichnen sich ab, die darauf hinweisen, wie menschliche Aktivitäten in die Optimierung eines Endlagers und die Überprüfung seiner Robustheit einbezogen werden könnten (vgl. Optimierung und Robustheit). Darüber hinaus trägt das Reflektieren künftiger Entwicklungen zur verantwortungsvollen Planung und Umsetzung der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle bei.

Die im Kapitel Stresstest – warum? formulierte Leitfrage:

Kann Zukunftsforschung einen Beitrag dazu leisten, die Langzeitsicherheit eines Endlagers zu optimieren?

wird daher mit ja beantwortet.

Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten sind ein Instrument, das die Sicherheitsuntersuchungen auf dem Entsorgungspfad sinnvoll begleiten kann. Wie die Sicherheitsuntersuchungen insgesamt müssen die Szenarien künftiger menschlicher Aktivitäten dabei weiterentwickelt und neue Erkenntnisse laufend aufgenommen werden.

Insgesamt deuten die im Ideenfeld dargelegten Szenarien darauf hin, dass sich das Verständnis des Endlagers in Richtung einer «dauerhaften gut abgeschirmten Entsorgungsan-

lage» entwickeln sollte, die nach ihrem Verschluss zwar keine aktiven Sicherheitsmaßnahmen mehr, aber doch Aufmerksamkeit, Vorsicht und Rücksichtnahme erfordert – insbesondere falls sich die Nutzung des geologischen Untergrunds in Deutschland in Zukunft intensiviert.

6. Literaturverzeichnis

- Allied Command Transformation 2016 *Visions of warfare 2036*. North Atlantic Treaty Organization NATO. Norfolk, VA
- Arte 2010 *Tchernobyl, une histoire naturelle?* https://boutique.arte.tv/detail/tchernobyl_une_histoire_naturelle. Abgerufen am 21.3.2021
- BABS – Bundesamt für Bevölkerungsschutz 2020 *Katastrophen und Notlagen. Bericht zur nationalen Risikoanalyse*. Bern
- Bailey L 2014 *Development of a generic safety narrative for a UK geological disposal facility*. Mineralogical Magazine, November 2015, Vol. 79(6), 1633–1640
- Benford G 1999 *Deep time. How humanity communicates across millenia*. Avon Books, Inc., New Books, Inc., New York
- BGE – Bundesgesellschaft für Endlagerung 2018 *Meldung – Standortsuche*. 24. Oktober 2018: Standortsuche: Warum schließt die BGE nicht erst einmal die Siedlungen aus? Rückschau zur Veranstaltung in Wolfenbüttel am 22. Oktober. <https://www.bge.de/de/endlagersuche/meldungen-und-pressemitteilungen/meldung/news/2018/10/257-standortsuche/> Abgerufen am 25.3.2021
- BGT – Bundesverband Geothermie 2021 *Seismizität, induzierte*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/s/seismizitaet-induzierte.html>. Stand Februar 2021. Abgerufen am 10.4.2021
- BGT 2020 *Risiko tiefegeothermischer Projekte*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/r/risiko-tiefegeothermischer-projekte.html>. Stand September 2020. Abgerufen am 18.2.2021
- Bmb+f – Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie 1996 *Kontinentales Tiefborhprogramm der Bundesrepublik Deutschland*. Ergebnisse eines Projekts zur Erforschung der Erdkruste. Broschüre. Bonn
- Brunnengräber A, von Hirschhausen Ch 2021 *Narrative und Gegen-Narrative – ein Bestandteil der wicked communication In Transdisziplinäre Entsorgungsforschung am Start*. TRANSENS-Bericht-02
- Bucheli R 2020 *Hat da jemand Diktatur gesagt?* Neue Zürcher Zeitung 17.3.2021
- Bundesrat 2021 *Die Sicherheitspolitik der Schweiz*. Bericht des Bundesrates. Entwurf, Stand: 14. April 2021. Bern
- Bundesregierung 2016 *Weißbuch zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr*. Berlin
- Buser, M. 2010 *Literaturstudie zum Stand der Markierung von geologischen Tiefenlagern*. Bundesamt für Energie. Bern
- CST – Cargo sous terrain AG 2021 *Cargo sous terrain*. Unternehmens-Webseite. <https://www.cst.ch/>. Abgerufen am 28.2.2021

- Dekker, S 2011 *Drift into Failure. From Hunting Broken Components to Understanding Complex Systems*. Taylor & Francis Group, Abingdon
- DOE – Department of Energy 2010 *Next generation nuclear plant*. A report to Congress. Washington DC
- Ebeling M 2021 *Persönliche Mitteilung*. 3.3.2021
- Eckhardt A 2021 *Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case*. TRANSENS-Bericht-01
- EGK – Eidgenössische Geologische Fachkommission 2021 *Untergrund-Strategie Schweiz*. Vorarbeiten der Kommission zur Entwicklung der Untergrund-Strategie
- EKRA – Expertengruppe Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle 2000 *Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle – Schlussbericht*. Autoren: Wildi, W., Appel, D., Buser, M., Dermange, F., Eckhardt, A., Hufschmied, P., Keusen, H.-R., Aebersold, M. Im Auftrag des Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation. 31.1.2000, Bern
- Endlager-Kommission – Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016 *Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes*. Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe.
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020a *Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020. Teil I Nr. 45
- EndlSiAnfV – Endlagersicherheitsanforderungsverordnung 2020b *Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle*. Referentenentwurf vom 6. April 2020 einschließlich Begründung
- European Commission 2008 *Attitudes towards radioactive waste*. Special Eurobarometer 297
- Fabbri P 2018 *The Ray Cat Solution*. <https://www.paolofabbri.it/recensioni-e-commenti/the-ray-cat-solution/>. Abgerufen am 3.12.2020
- FAZ – Frankfurter Allgemeine Zeitung 2008 *Erdbeben durch Kohleabbau*. <https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/saarland-erdbeben-durch-kohleabbau-1515098.html>. Stand 23.2.2008. Abgerufen am 10.4.2021
- Fischer R 2018 *Immer tiefer forscht der Mensch*. Horizonte – Das Schweizer Forschungsmagazin Nr. 118. 16-17
- GAO – United States Government Accountability Office 2017 *Internet of Things. Status and implications of an increasingly connected world*. Technology Assessment. Washington DC
- GAO 2015 *Nuclear reactors. Status and challenges in development and deployment of new commercial concepts*. Technology Assessment. Washington DC

- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit gGmbH 2012 *FEP-Katalog für die VSG. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Bericht zum Arbeitspaket 7. Wolf J, Behlau J, Beuth T, Bracke G, Bube C, Buhmann D, Dresbach C, Hammer J, Keller S, Kienzler B, Klinge H, Krone J, Lommerzheit A, Metz V, Mönig J, Mrugalla S, Popp T, Rübel A, Weber JR. Köln
- Gruevska J, Lessing HU 2020 *Der Begriff einer "philosophischen Anthropologie"* 33-44 in Heßler M, Liggieri K (Hrsg.) 2020 *Technikanthropologie. Handbuch für Wissenschaft und Studium*. Edition sigma in der Nomos Verlagsgesellschaft. Baden Baden
- Grunwald A 2013 *Wissenschaftliche Validität als Qualitätsmerkmal der Zukunftsforschung*. Zeitschrift für Zukunftsforschung. Jahrgang 2, Ausgabe 1. 22-33
- Grunwald A 2007 *Umstrittene Zukünfte und rationale Abwägung. Prospektives Folgenwissen in der Technikfolgenabschätzung*. Technikfolgenabschätzung – Theorie und Praxis Nr. 1, 16. Jg. S. 54-63
- Hegglund J 2020 *Unnatural narratology and weird realism in Jeff VanderMeer's annihilation*. 27-44. In James E, Morel J (eds) 2020 *Environment and narratives. New directions in econarratology*. The Ohio State University Press. Columbus
- Heinonen S 2013 *The dance of the black swans*. In: The Committee für the Future 2013 *Black Swans – what will change the world next? Entries from the writing contest of the Committee of the Future of the parliament of Finland*. The Publishing series of The Committee for the Future 5/2013. Helsinki
- Heller P. 2016 *Ferngesteuerte Insekten. Moralisch vertretbar oder ethisches No-Go?* https://www.deutschlandfunk.de/ferngesteuerte-insekten-moralisch-vertretbar-oder-ethisches.676.de.html?dram:article_id=359799. Deutschlandfunk. Stand 11.7.2016. Abgerufen am 24.5.2021
- Hora SC, von Winterfeldt D 1997 *Nuclear waste and future societies: A look into the deep future*. Technological forecasting and social change 56. 155-170
- Huguet B 2016 *The Ray Cat Solution*. Aeon Videos. <https://vimeo.com/138843064>. Abgerufen am 12.4.2021
- IAEA – International Atomic Energy Agency 2012 *The safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste*. Specific Safety Guide No. SSG-23. Wien
- IAEA 2011 *Disposal of radioactive waste*. Specific safety requirements No. SSR-5. Wien
- IRSN - Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire 2015 *Review of Generation IV Nuclear Energy Systems*. Fontenay-aux-Roses
- ITA AIT – Institut für Technikfolgenabschätzung/Austrian Institute of Technology 2019 *For-sight und Technikfolgenabschätzung. Monitoring von Zukunftsthemen für das Österreichische Parlament*. Berichtsversion: November 2019 mit späteren Aktualisierungen. Projektbericht Nr. ITA-AIT-10. Stand 4.1.2021
- Kehl C, Coenen C 2016 *Technologien und Visionen der Mensch-Maschine-Entgrenzung*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Arbeitsbericht Nr. 167. Berlin

- Kind S, Jetzke T, Nögel L, Bovenschulte M, Ferdinand JP 2020 *New Space – neue Dynamik in der Raumfahrt*. TAB-Kurzstudie Nr. 1. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Berlin
- Kind S, Bogenstahl Ch. 2017 *Neue Weltordnung – digitale Plattformen als neuartige Nationen*. Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. Themenkurzprofil Nr. 14. Berlin
- MacKay RB, Kiernan P 2018 *Scenario Thinking. A historical evolution of strategic foresight*. Cambridge University Press. Cambridge
- MDR – Mitteldeutscher Rundfunk 2021 *Straße eingebrochen*. <https://www.mdr.de/nachrichten/sachsen/chemnitz/annaberg-aue-schwarzenberg/schneeberg-loch-strasse-eingebrochen-102.html>. Stand 22.2.2021. Abgerufen am 10.4.2021
- Metzler oJ *Zukunftsverantwortung* Metzler Lexikon Philosophie bei Spektrum.de. <https://www.spektrum.de/lexikon/philosophie/zukunftsverantwortung/2276>. Abgerufen am 21.3.2021
- Musk E 2017 *The future we're building - and boring*. <https://www.youtube.com/watch?v=zIwLWfaAg-8>. Abgerufen am 17.2.2021
- Nagra – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle 2002 Project Opalinus Clay. Safety Report. *Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*. Technical Report 02-05. Wettingen
- NEA – Nuclear Energy Agency 2019 *International features, events and processes (IFEP) list for the deep geological disposal of radioactive waste*. Version 3.0. Radioactive Waste Management and Decommissioning NEA/RWM/R(2019)1. Paris
- NEA 2016 *Scenario Development Workshop Synopsis*. Integration Group for the Safety Case. Radioactive Waste Management. NEA/RWM/R(2015)3. Paris
- Neuhaus C 2015 *Prinzip Zukunftsbild*. 21-30. Gerhold L, Holtmannspötter D, Neuhaus C, Schüll E, Schulz-Montag B, Steinmüller K, Zweck A *Standards und Gütekriterien der Zukunftsforschung. Ein Handbuch für Wissenschaft und Praxis*. Springer Fachmedien. Wiesbaden
- Neumann W., Kreusch J. 2018 *Vergleichende Risikobewertung zu Auswirkungen von schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen bei den ENTRIA-Referenzmodellen*. ENTRIA-Arbeitsbericht-11. Hannover
- Parriaux A, Blunier P, Maire P, Dekkil G, Tacher L 2010 *Projet Deep City. Ressources du sous-sol et développement durable des espaces urbains*. Vdf Hochschulverlag AG. Zürich
- Richter A 2020 *Ultra-Deep Geothermal Energy Program (UDG) in the Netherlands*. <https://www.thinkgeoenergy.com/ultra-deep-geothermal-energy-program-udg-in-the-netherlands/> Abgerufen am 18.2.2021
- Roßmann M, Berg M 2021 *Framing und Narrative in Bezug auf die Entsorgung radioaktiver Abfälle*. In *Transdisziplinäre Entsorgungsforschung am Start*. TRANSENS-Bericht-02

- Sebeok, T.A. 1984: *Die Büchse der Pandora und ihre Sicherung: Ein Relaisystem in der Obhut einer Atompriesterschaft*. Zusammenfassung. Zeitschrift für Semiotik. https://www.semiotik.tu-berlin.de/menue/zeitschrift_fuer_semiotik/zs_hefte/bd_6_hft_3/#c185966. Abgerufen am 18.5.2020
- SpaceX 2021 *SpaceX*. Unternehmens-Webseite. <https://www.spacex.com/>. Abgerufen am 28.2.2021
- Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V. 2015 *Generische Tiefenlagermodelle zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung*. ENTRIA-Arbeitsbericht 03, Hannover. ISSN Print: 2367-3532. ISSN Online: 2367-3540
- Stand AG – *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle* (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr.26, S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808)
- STK – Schweizerisches Talsperrenkomitee 2020 *Eine der grössten Herausforderungen für Ingenieure*. <http://www.swissdams.ch/de/les-barrages/un-grand-defi-pour-l-ingenieur>. Abgerufen am 11.1.2021
- TBC – The Boring Company 2021 *The Boring Company*. Unternehmens-Webseite. <https://www.boringcompany.com/>. Abgerufen am 28.2.2021
- TFS – Technisches Forum Sicherheit 2013 *Frage 52: Behandlung von Iod*. <https://www.ensi.ch/de/technisches-forum/behandlung-von-iod/>. Abgerufen am 27.5.2021.
- Thränert O 2018 *Neue Herausforderungen der nuklearen Rüstungskontrolle*. CSS Analysen zur Sicherheitspolitik Nr. 232, Oktober 2018
- TNO - Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek 2020 *Uncovering an invisible world. Geological survey of the Netherlands*. Den Haag
- Van Rij 2013 *New emerging issues and wild cards as future shakers and shapers*. 67-89. Giaoutzi M, Sapio B *Recent developments in foresight methodologies. Complex networks and dynamic systems 1*. Springer Science + Business Media. New York
- WEF – World Economic Forum 2019 *The Global Risks Report 2019*. 14th Edition. Geneva
- Wikipedia 2021 *Deinococcus radiodurans*. https://en.wikipedia.org/wiki/Deinococcus_radiodurans. Abgerufen am 28.3.2021
- Zukunftsinstitut 2012 *X-Events: Acht apokalyptische Szenarien*. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/y-events/x-events-acht-apokalyptische-szenarien/>. Stand Dezember 2012. Abgerufen am 21.3.2021
- Zukunftsinstitut oJ *Neo-Tribes*. <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/wir-gesellschaft/neo-tribes/>. Abgerufen am 10.4.2021